

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2012

Bc. Lukáš Bartoš

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

Vyrovnávací obvody pro superkapacitory

Balancing Circuits for Supercapacitors

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Lukáš Bartoš

Studijní program:

N2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

2612T015 Elektronika

Téma:

Vyrovňovací obvody pro superkapacitory
Balancing Circuits for Supercapacitors

Zásady pro vypracování:

1. Uveďte důvody použití vyrovňovacích obvodů superkapacitorů a možnosti jejich realizace
2. Navrhněte a realizujte vybraný typ vyrovňovacího obvodu
3. Proveďte měření pro posouzení správné činnosti realizovaného obvodu

Seznam doporučené odborné literatury:

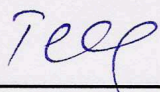
Dle pokynů vedoucího závěrečné práce

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Tomáš Pavelek, Ph.D.**

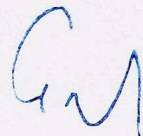
Datum zadání: 18.11.2011

Datum odevzdání: 04.05.2012



doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry






prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

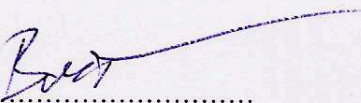
V Ostravě 4. 5. 2012


.....

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 ods. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 4. 5. 2012


.....

Poděkování

Chci touto cestou poděkovat panu Ing. Tomáši Pavelkovi Ph.D., odbornému asistentovi, který mi dělal vedoucího diplomové práce a poskytl podstatné informace pro zpracování této práce. Dále bych poděkoval svým rodičům, kteří mi finančně umožnili studium na VŠB-TU Ostrava.

Abstrakt

Superkapacitor je v principu elektrolytický kondenzátor vyrobený za účelem dosažení vysoké kapacity řádu tisíců Faradů při zachování vlastností kondenzátoru. Tato technologie je založena na tzv. elektrochemické dvouvrstvě, proto se superkapacity označují také zkratkou EDLC. Omezením pro superkapacitor je hodnota provozního napětí cca $2,5V$, avšak je vhodný pro ukládání a rychlé dodávání elektrické energie. Pro větší napětí je nutné řadit superkapacity do série, což ovšem vyžaduje použití ochranných vyrovnávacích obvodů. Vyrovnávací obvody rozdělujeme na pasivní a aktivní. Tato práce teoreticky pojednává o obou typech obvodů a popisuje také vliv vyrovnávání na životnost superkapacitorů. Podstatou je pak popis, vysvětlení činnosti a realizace aktivního vyrovnávání. Výsledky správné funkce vyrovnávání jsou potvrzeny měřeními a testováním obvodu.

Klíčová slova

Supercapacitor, článek, modul, kapacita, vyrovnávání, pasivní vyrovnávání, aktivní vyrovnávání, nabíjení, proudový zdroj, tranzistor, komparátor, napěťový detektor, snižovací – zvyšovací, blokující, měnič

Abstract

A supercapacitor is in principle an electrolytic condenser produced to gain high capacity of thousands Farads and to keep parameters of a condenser in the same time. This technology is based on so-called electrochemical double-layer and therefore these supercapacitors are called EDLC. The supercapacitor limitation is a value of operation voltage cca 2.5 V , but it is applicable for storage and fast supply of electric energy. For higher operation voltages there is necessary to stack supercapacitors in series but it demands usage of protective balancing circuits. Balancing circuits are active or passive. This thesis deals theoretically with both types of these circuits and it describes also balancing circuit effect to supercapacitors operating life. The core is description and clarification of operation and implementation of active compensation. Results of the proper active compensation are proved by measurements and circuit testing.

Keywords

Supercapacitor, cell, modul, capacity, balancing, passive balancing, active balancing, charging, current source, transistor, comparator, voltage detector, buck – boost, flyback, converter

Seznam použitých symbolů a zkratek

AVO	.....	Aktivní vyrovnávací obvod
BIOS	.....	Inicializační a konfigurační systém
CNT	.....	Uhlíkové nanovlákn
DC-DC	.....	Stejnoseměrný převod
EDLC	.....	Elektrochemický dvoustupňový kapacitor
EMR	.....	Energetické makromodelové zobrazení
ESR	.....	Ekvivalentní sériový odpor
HEV	.....	Hybridní elektrické vozidlo
IC	.....	Integrovaný obvod
LED	.....	Svitivá dioda
MOS-FET	.....	Polem řízený tranzistor
PDA	.....	Osobní digitální asistent
UPS	.....	Nepřetržitý záložní zdroj
ZDR	.....	Zdroj napětí - proudu
D_{eng}	.....	Měrná energetická hustota [$Wh \cdot kg^{-1}$]
C	.....	Elektrická kapacita [F]
I	.....	Elektrický proud [A]
M	.....	Hmotnost [kg]
R	.....	Elektrický odpor [Ω]
$R_{DS(on)}$	.....	Elektrický odpor v sepnutém stavu [Ω]
S	.....	Obsah [m^2]
t	.....	Čas [h]
T	.....	Teplota [$^{\circ}C$]
U	.....	Elektrické napětí [V]
W	.....	Energie el. pole [J]
ϵ_r	.....	Relativní permitivita (dielektrická konst.) [-]

Obsah

Úvod	1
1. Superkapacity a jejich aplikace	2
1.1. Co je superkapacitor?	2
1.2. Struktura superkapacitoru	3
1.3. Využitelná účinnost superkapacitoru a jeho životnost	6
1.4. Aplikace	7
1.4.1. Aplikace v dopravním strojírenství	8
1.4.2. Aplikace v průmyslovém strojírenství	8
1.4.3. Aplikace v inženýrství elektronických zařízení	9
1.5. Souhrn	10
2. Vyrovnávací obvody pro superkapacity	11
2.1. Sériová zapojení – pasivní a aktivní vyrovnávání napětí	11
2.2. Sériové zapojení superkapacitorů	13
2.3. Napěťové vyrovnávací obvody – Pasivní vyrovnávání	14
2.4. Napěťové vyrovnávací obvody – Aktivní vyrovnávání	18
2.4.1. Hlavní kritéria pro vyrovnávání napětí	19
2.4.2. Blokující stejnosměrný měnič s rozděleným sekundárem	27
2.4.3. Proudový rozdělovač užívající propojených snižovacích - zvyšovacích měničů ..	31
2.4.4. Proudový rozdělovač s použitím propustných stejnosměrných měničů a rozděleným primárem	33
3. Navrhování obvodů se superkapacity	36
4. Realizace a popis obvodu pro aktivní vyrovnávání napětí	38
4.1. Popis pro jednotlivé prvky v zapojení	39
4.2. Bližší popis malovýkonového napěťového detektoru STM1061	40
4.3. Vlastnosti a výhody napěťového vyrovnávacího obvodu	42
4.4. Výsledky měření a grafy	47
4.5. Realizace aktivního vyrovnávacího obvodu	50
5. Závěr	52
Seznam obrázků	54
Seznam tabulek	56
Seznam příloh	57
Seznam použité literatury	58

Úvod

Superkapacitor (používají se i názvy ultrakapacitor, dvouvrstvý elektrochemický kondenzátor) je v principu elektrolytický kondenzátor vyrobený speciální technologií za účelem dosažení vysoké kapacity řádu tisíců Faradů při zachování vlastností kondenzátoru, zejména schopnosti rychlého nabíjení a vybíjení.

Kapacita kondenzátoru je přímo úměrná ploše elektrod a nepřímo úměrná vzdálenosti elektrod (nábojů). Elektrody superkapacitoru tvoří práškový uhlík, nanesený na hliníkové fólii. Zrna uhlíkového prášku mají plochu až 2000 m^2 na 1 gram prášku. Dvě elektrody jsou odděleny separační fólií z polypropylenu, prostor mezi elektrodami je vyplněn tekutým elektrolytem. Velká plocha elektrody a velmi malá vzdálenost jednotlivých zrn uhlíku (řádu 10^{-10} m) vytváří kapacitu řádu Faradů. Tato technologie je založena na tzv. elektrochemické dvouvrstvě, proto se superkapacitory označují také zkratkou EDLC (Electrochemic Double Layer Capacitor). Energie je v superkapacitoru uložena elektrostaticky, stejně jako u klasického kondenzátoru. Vzdálenost uhlíkových zrn zároveň omezuje provozní napětí kondenzátoru na hodnotu cca $2,5\text{ V}$. Výsledkem je polarizovaný kondenzátor s velmi velkou kapacitou a velmi malým sériovým odporem, vhodný pro ukládání a rychlé dodávání elektrické energie. Pro větší napětí je nutné řadit superkapacitory do série, což ovšem vyžaduje použití ochranných balančních - vyrovnávacích obvodů.

1. Superkapacitory a jejich aplikace

Poptávka po lehčích, kompaktních, bezdrátových a přenosných zařízeních s dokonalejšími funkcemi stěsnanými v ještě menším prostoru, vede k hledání inovací zdrojů energie – výkonných, vytrvalých a kompaktních baterií. Současná technologie baterií často splňuje prostorové a hmotnostní specifikace, ale je kompromisem z hlediska špičkového výkonu. Baterie nejsou konstruovány, aby splnily ty nejdůležitější požadavky na zdroje energie: poskytovat výkonové pulzy v řádově sekundových časových úsecích a v množství čítajících stovky tisíc cyklů. Ultrakapacitory, také nazývané superkapacitory, nabízejí alternativní zdroj, který umožní překlenout potíže těchto baterií a dosáhnout vyšší efektivity ze stávajících zdrojů energie. Nabízejí tak nekonečný potenciál růstu, protože reagují na klíčový zájem a potřeby společnosti: jsou šetrné k životnímu prostředí, pomáhají šetření energie, zvyšují výkon a přenosnost spotřebitelských zařízení. Superkapacitory také nemají typické problémy baterií: omezenou životnost, citlivost na nízké teploty a kritické nabíjecí hodnoty. Těmito vlastnostmi se stávají velmi dobrou volbou pro praktické využití a budou revolučním krokem ve zdrojích energie s dlouhou životností a vysokým výkonem.

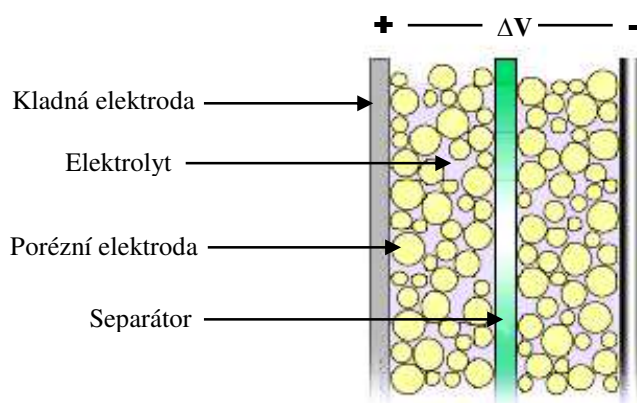
1.1. Co je superkapacitor?

Jako každý kondenzátor, je superkapacitor v základě složen ze dvou paralelních vodivých desek oddělených izolačním materiálem, tzv. dielektrikem. Kapacita kondenzátoru je přímo úměrná ploše těchto desek a nepřímo úměrná tloušťce dielektrika. Výrobci superkapacitorů dosahují vyšších hodnot kapacitance, když snižují velikost užitím porézního uhlíkového materiálu na desky tak, aby se maximalizovala plocha a molekulární slabost elektrolytu, jako dielektrika k minimalizaci vzdálenosti mezi deskami. Tímto postupem mohou vyrobit kapacitory s hodnotami od 16 mF do $2,3\text{ F}$. Taková konstrukce těchto zařízení znamená velmi nízký vnitřní odpor, což umožňuje dodávat pulsy špičkového proudu s minimálním úbytkem výstupního napětí.

Konvenční elektrolytický kondenzátor, používaný po desetiletí, je zařízení pro uchovávání energie, které lze přirovnat k nádobě postupně se naplňující elektrickou energií a následně ji dodává v případě potřeby nebo náhlého pulsu. Superkapacitor, který je nabízen teprve krátce, je vysokokapacitní verzí konvenčního kapacitoru a je schopen zadržet stokrát více energie na jednotku objemu nebo hmoty, než nejmodernější běžný kondenzátor. Při plném nabití dodávají superkapacitory okamžitou energii v kompaktní a přístupné podobě. Dlouhodobé problémy s ekonomickou náročností vyřešil nástup levných kompaktních superkapacitorů s výjimečně vysokou účinnou plochou, skvělou vodivostí a špičkovou chemickou a fyzikální stabilitou, které znamenají novou éru jejich praktického využití.

1.2. Struktura superkapacitoru

Superkapacitor lze vidět jako dvě nereaktivní porézní desky nebo kolektory, zavěšené v elektrolytu, které mají napěťový potenciál. Na samostatné individuální superkapacitorové buňce se uplatňuje potenciál kladné elektrody přitahující negativní ionty v elektrolytu, zatímco negativní elektroda přitahuje pozitivní ionty. Dielektrický separátor mezi těmito dvěma elektrodami zabraňuje náboji pohybovat se mezi nimi.

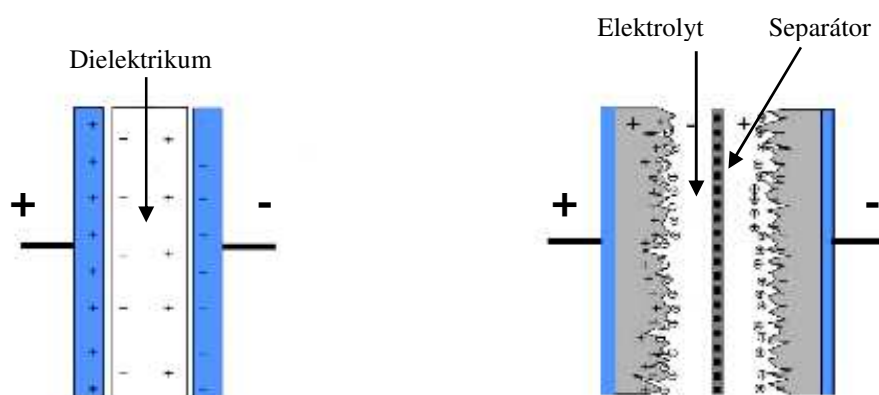


Obrázek č.1 Struktura superkapacitorového článku

Srovnání s běžnými kapacitami

V typickém kondenzátoru jsou elektrony přesunovány z jedné desky a uchovávány na druhé. Polarizované molekuly v dielektriku zahušťují elektrické pole. Hlavním faktorem určujícím kapacitanci je velikost plochy desek.

Superkapacitor dokáže nashromáždit více energie než běžný kapacitor, protože aktivní uhlík má porézní vnitřek jako houba. Ionty v elektrolytu se mohou zachycovat na větší ploše. Rozdíl lze jasně pochopit pomocí následujících nákrešů.



Obrázek č.2 Struktura elektrolyt. kondenzátoru (vlevo) a superkapacitoru s aktivním uhlíkem (vpravo)

Použití aktivního uhlíku efektivně zvyšuje účinnou plochu kapacitoru mnohonásobně oproti elektrolytickému kondenzátoru. Vrstva aktivního uhlíku je nanášena na vnitřní stranu hliníkových elektrod, které jsou tvořeny hliníkovou fólií. Aktivní uhlík ve formě prášku je tvořen velmi malými částicemi, v celém objemu vytvářejí velice pórovitý povrch, jehož plocha je obrovská. Aktivní uhlík je tvořen uhlíkovým aerogelem. Jde o pevný materiál s nízkou hustotou, vzniklý nahrazením tekuté složky gelu vzduchem. Dalším používaným materiálem jsou uhlíkové polymery. Elektrody kondenzátoru jsou odděleny separátorem (polypropylenová fólie) a jsou obklopeny elektrolytem, který je tekutý nebo ve formě gelu. Tloušťka dielektrika (el. dvouvrstvy) je velmi malá, řádově $10^{-10} m$. Právě díky kombinaci obrovské plochy a velmi tenké dvouvrstvy se dosahuje velké schopnosti vázat náboj a tedy vysoké kapacity superkapacitoru při malém sériovém odporu. Určitou nevýhodou, vzhledem k vlastnostem elektrolytu a možnému průrazu elektrické dvouvrstvy je nízké provozní napětí, jehož hodnota se pohybuje v rozmezí 2,3–2,7 V v případě velmi používaného organického elektrolytu. Pro větší napětí je nutné řadit superkapacitory do série, což ovšem vyžaduje použití ochranných balančních obvodů. Výsledkem je významný nárůst kapacity a koncentrace energie podle vzorce

$$C = \frac{\epsilon_r \cdot A}{d} \quad (1)$$

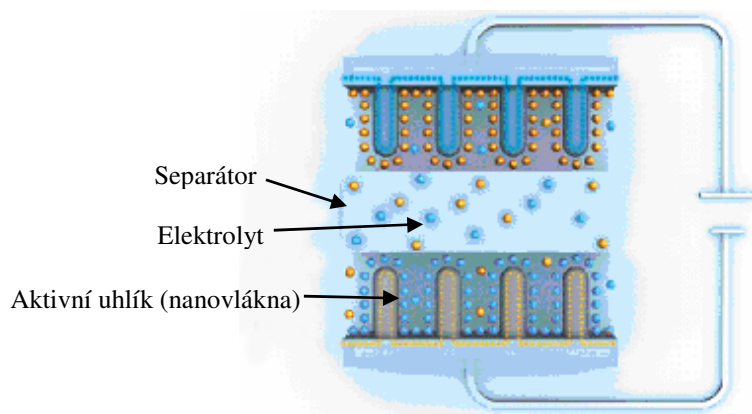
minimalizovat (d)

maximalizovat (A)

$$W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 \quad (2)$$

Při použití aktivního uhlíku pro elektrody, který je vysoce porézním uhlíkovým materiálem a s účinnou plochou až $2000 m^2 / g$ prášku, mohou dosahovat komerční superkapacitory mnohem větší měrné energetické hustoty, než u klasických konvenčních kapacitorů.

Podle posledního výzkumu se navrhuje náhrada aktivního uhlíku modifikovaným uhlíkem s trubičkovou strukturou, kdy trubička má rozměry řádově nm s možností uchovávat ještě větší množství energie, díky menším rozměrům a pravidelnějšímu rozmístění iontů, viz dále.

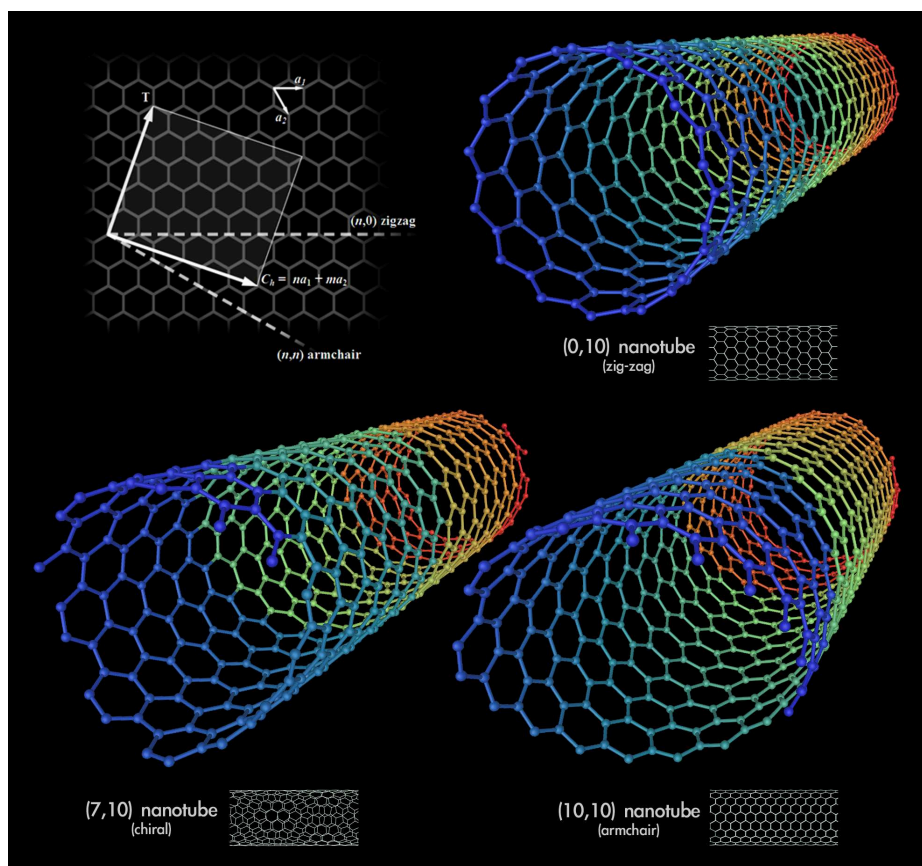


Obrázek č.3 Struktura superkapacitoru s modifikovaným uhlíkem (CNTs)

Modifikovaný uhlík s trubičkovou strukturou (anglicky: carbon nanotubes, CNTs)

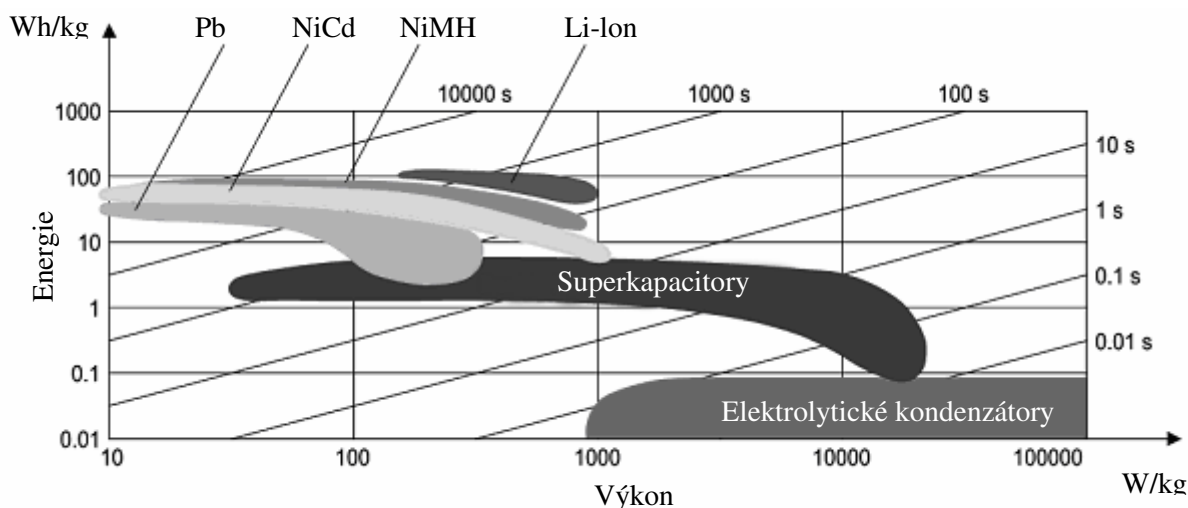
Uhlíkové nanotrubičky jsou podlouhlé útvary, jejichž stěny jsou tvořeny atomy uhlíku o průměru 1 až 100 nanometrů a o délce do 100 μm . Mohou být jedno či vícečetné.

Slouží jako výborné vodiče, neboť se v nich mohou elektrony pohybovat téměř volně, odpor nanotrubic je velmi malý a téměř nezávislý na její délce.



Obrázek č.4 Typy modifikovaného uhlíku s trubičkovou strukturou

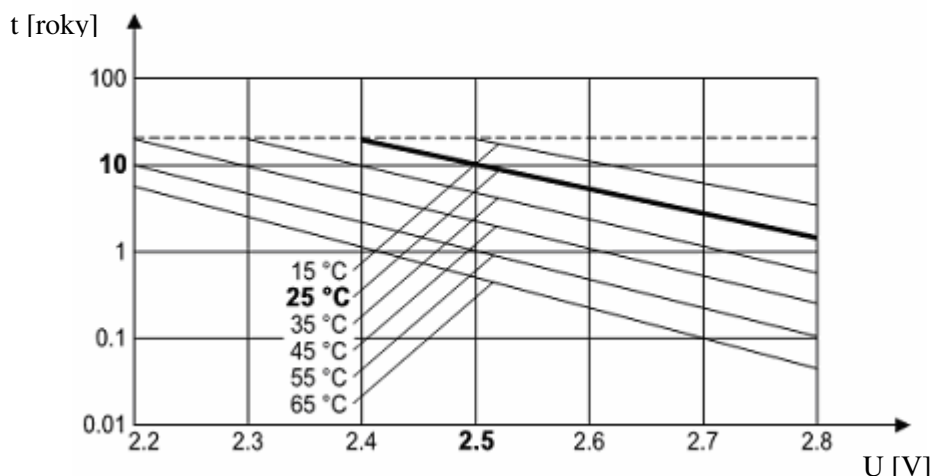
Z charakteristik energie vs. příkon vidíme, že superkapacitory ($6 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$) mají mnohem větší měrné energetické hustoty ve srovnání s konvenčními kapacitami. Avšak toto číslo je mnohem nižší, než měrné energetické hustoty dosažené Lithium-ionovými bateriemi ($120 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$). To jasně potvrzuje, že superkapacitory nemohou samy o sobě nahradit běžné baterie.



Obrázek č.5 Porovnání různých zdrojů el. energie s ohledem na měrnou energii a výkon

1.3. Využitelná účinnost superkapacitoru a jeho životnost

Podle toho s jakou efektivitou dochází k ukládání energie do superkapacitoru a efektivita jejího znovuvyužívání závisejí podstatnou měrou na účinnosti přenosu výkonu mezi místem odběru / zdrojem přebytečné energie a superkapacitorem. Především se jedná o účinnost zvyšovacího / snižovacího měniče, který je obvykle přítomen a ke kterému je připojen superkapacitor. Dále jsou to ohmické ztráty v přenosu el. energie. Účinnost samotného superkapacitoru je velmi vysoká (až 98 %). V porovnání s akumulátory je životnost superkapacitoru daleko vyšší. Výrobci uvádějí až 1 milion nabíjecích/vybíjecích cyklů, přičemž i po dosažení tohoto limitu je superkapacitor stále schopen funkce, ovšem se zhoršenými vlastnostmi (snížená kapacita, zvýšený vnitřní ekvivalentní sériový odpor ESR). Působením cyklického nabíjení a vybíjení se snižuje kapacita a zvyšuje ESR, konec životnosti je definován pro pokles jmenovité kapacity o 20 % nebo zvýšení ESR o 100 %. Dalším faktorem, který ovlivňuje kapacitu a ESR superkapacitoru je teplota a provozní napětí. Udávaná životnost (až 10 let) platí pro teplotu superkapacitoru 25°C , každým dalším zvýšením teploty o 10°C se životnost snižuje na polovinu. Např. při trvalém provozu s teplotou 65°C je životnost necelý 1 rok. Rovněž při provozu na napětí vyšším než jmenovitém dochází k rapidnímu snížení kapacity a tedy životnosti.



Obrázek č.6 Životnost superkapacitoru v závislosti na provozním napětí

Pokud navrhujeme systém je nutné brát v úvahu tyto faktory, neboť budou podstatnou měrou ovlivňovat výslednou kapacitu superkapacitoru. Významným pozitivem je nesávislost aktuální hodnoty kapacity na teplotě, což je nesporná výhoda oproti akumulátorům, které trpí výrazným poklesem kapacity při nízkých teplotách. Vnitřní odpor (ESR) se zvyšuje se snižující teplotou, což je dáno sníženou schopností přesunu iontů v elektrolytu.

V praxi je nutné jednotlivé superkapacitory sério-paralelně spojovat do tzv. kondenzátorových baterií z důvodu velmi nízkého napětí jednoho superkapacitoru (cca 2,5 V). Díky tolerancím ve výrobě mají superkapacitory stejného typu různé parametry (C, ESR, samovybíjecí proud). Poté však sériové spojení přináší problém nestejného rozložení napětí na jednotlivých prvcích. Možným řešením je použití pasivních nebo aktivních balančních obvodů. Pasivní řešení spočívá v trvalém připojení odporu paralelně ke svorkám superkapacitoru. Velikost tohoto odporu závisí na svodovém proudu superkapacitoru a na požadované rychlosti vyrovnání napětí. Aplikace tohoto způsobu se používá v systémech s nízkou dynamikou výměny el. energie, např. u záložních zdrojů. Druhou možností je využití aktivního balančního obvodu, který dle aktuální situace vyrovnává napětí na jednom nebo mezi dvěma sousedními prvky. V tomto případě se jedná o komparátor s přesnou referencí, který v případě nutnosti připojuje vybíjecí odpor na svorky superkapacitoru. Toto řešení je nutné použít v aplikacích, kde dochází k rychlému střídání nabíjecích a vybíjecích cyklů (např. pohon vozidla).[4]

1.4. Aplikace

Supercapacitory poskytují krátkodobé proudové pulsy, a proto nejsou platnou náhradou baterií. Mohou být použity k prodloužení životnosti baterií, zapojí-li se paralelně se zdrojem. V okamžicích požadavku na vysoký proud, kapacitor tento proud poskytne, tím redukuje zátěž baterie a prodlužuje její životnost. Supercapacitory nacházejí mnohá uplatnění v následujících odvětvích.

1.4.1. Aplikace v dopravním strojírenství

Superkapacitory jsou ve velkém měřítku dobrou volbou pro použití v dopravním inženýrství. Nekonečné opakované cykly zrychlování a brzdění vozidel a vysokotonážních dopravních prostředků jsou pro tuto technologii ideální. Zde jsou superkapacitory používány pro uchovávání energie při brzdění a její následné využití při akceleraci, nebo na pokrytí běžných potřeb doplňkových elektrických systémů. To se provádí buď zařízením přímo na vozidle, nebo stacionárním systémem. Stacionární zásobníky energie se superkapacitory byly vyvinuty nedávno a mohou pracovat dvěma způsoby. Za prvé, taková zařízení jsou schopna ukládat energii z brzdění lehkých kolejových vozidel a uvolňovat ji v následné akcelerační fázi odjíždějícího vlaku. Tak tento akumulací systém významně redukuje náklady - množství primární energie je značně redukováno. Za druhé, toto zařízení lze využít ke stabilizaci napěťového systému, typicky 750V. V tomto případě je akumulací systém udržován plně nabitý a vybíjí se pouze, pokud napětí v systému padá pod definovanou hranici. Zařízení je potom dobíjeno brzdícím vozidlem, a nebo pomalu přes stejnosměrnou síť. Snížení nákladů je dosaženo vyřazením subsystémů.

Výrobci automobilů vyvíjejí snahu s cílem snižovat spotřebu paliv u řady produktů, kde jsou integrovány moderní hnací jednotky. Pravděpodobně nejslibněji se jeví řešení HEV – hybridní elektrické vozidlo. Výrobci HEV se zaměřují na uvolnění zátěže baterie během vysokých výkonových požadavků – jako je akcelerace a brzdění. To jsou okamžiky, kdy jsou baterie vystaveny vysokým proudům. Vyrovnáváním těchto špičkových proudů vydrží baterie déle a tím se šetří náklady. Superkapacitory významně zlepšují hospodaření s energií v HEV a prodlužují životnost baterie. Navíc superkapacitory podporují nižší emise, lepší využití paliva a zdokonalují hnací schopnosti pohonů. Novější systémy se superkapacitory umožňují HEV akumulovat a znovu použít získanou energii z brzdění.

1.4.2. Aplikace v průmyslovém strojírenství

Mnoho průmyslových firem již v současné době zapojilo používání systémů se superkapacitory ve výrobní elektronice. Aplikace superkapacitorů ve zdvihacích a dopravníkových systémech redukuje špičkový odběr energie ze sítě a dosahují energetických úspor.

Krátké odchylky napájecího napětí mohou ovlivnit nebo přerušit správný běh elektrického zařízení. Nepřerušitelné zdroje energie (UPS) se proto užívají ke zvýšení kvality příkonu a zajištění spolehlivého záložního zdroje. Během napěťových výpadků nebo úplných přerušení dodávky elektrické energie musí fungovat lokální záložní zdroj energie. Toto akumulací zařízení je přímo napojeno na stejnosměrný okruh a pracuje v pohotovostním režimu.

Olověné akumulátory, konvenční akumulací zdroj pro UPS, nemohou být konstruovány na překlenutí výpadku menšího než pár minut. Naopak superkapacitory, v případě výpadku nebo přerušení

elektrické energie po několik sekund, jsou ideálním akumulátorem energie pro udržování napětí stejnosměrného okruhu.

Další výhody jako dlouhá životnost, nulová údržba, nenáročné testování, možnost úplného vybití a krátké nabíjecí časy v případě častých poruch dodávky elektrické energie, dělají ze superkapacitorů skvělá zařízení, která po krátkou dobu uchovávají energii v aplikacích UPS.

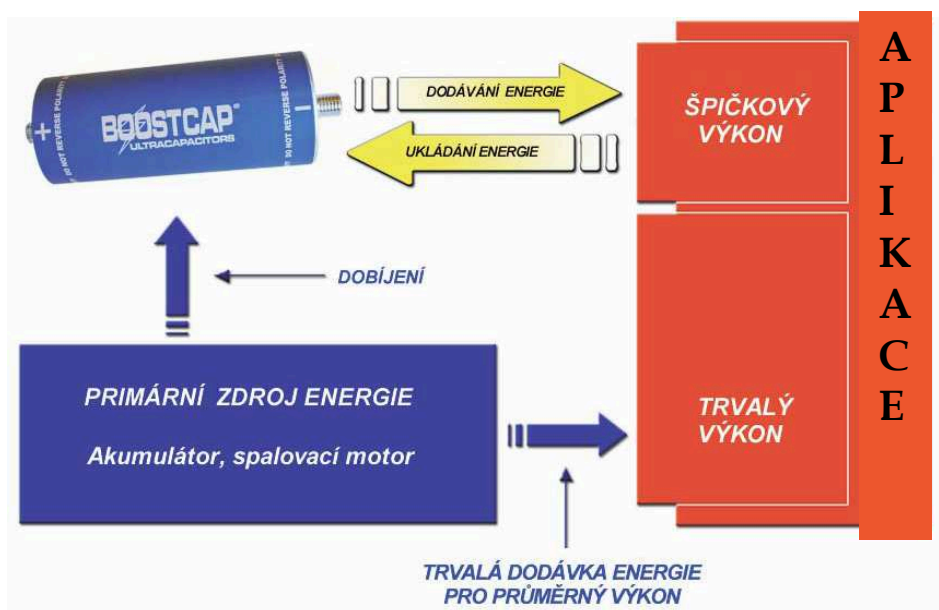
1.4.3. Aplikace v inženýrství elektronických zařízení

V poplávkce po menších a lehčích zařízeních vývojáři vyžadují redukci velikosti a hmotnosti bez omezení celkového výkonu a spolehlivosti. Baterie, která je hlavním zdrojem energie v přenosných zařízeních, je stálou výzvou v hledání ideální velikosti, hmotnosti a výkonu. V aplikacích vyžadujících jen velké množství elektrické energie, ale spotřebujících malý výkon (kalkulačky, hodiny, radiopřijímače) je baterie nebo sada baterií více než dostatečným zdrojem malého proudu po určitou dobu fungování výrobku. V zařízeních s požadavkem na vyšší výkon v krátkém čase – oblast vyšších proudů - je superkapacitor mnohem účinnější.

Pro superkapacitory existují dvě primární oblasti využití. První je pro dočasný záložní zdroj v elektronických zařízeních jako nastavování v PC - BIOS, nastavování konfigurací v telefonech, fotoaparátech, sekundárních pohotovostních zdrojích, aktivovaných pokud primární zdroj nefunguje. Zde jsou superkapacitory nabíjeny z primárního zdroje, ale fungují jako záložní zdroj energie, když primární napájení selže. Druhým využitím superkapacitorů je dodávka špičkového příkonu v elektronice. V těchto aplikacích jsou superkapacitory použity v systémech společně s bateriemi, kde se požaduje jak stabilní vybíjení při normální funkci, tak příkonové pulsy pro zátěž ve špičce. Zde superkapacitory napomáhají bateriím a prodlužují tak jejich životnost, redukují velikost baterií a tím velikost zařízení. Superkapacitory se už používají i v zařízeních jako jsou přenosné skenery, čtečky bar kódu a digitální fotoaparáty.

V typické aplikaci ve skeneru superkapacitor dodává pulzní energii funkčně nezbytnou pro aktivaci systému spouštěných pulzů a laserů, které čtou bar kód, zatímco baterie poskytují nízkou spotřebu energie pro paměťové jednotky a základní fungování. V důsledku toho superkapacitory vyrovnávají zatížení baterií a prodlužují celkovou životnost skeneru. A protože baterie nedodávají energii pro špičkový výkon, můžeme použít menší velikosti baterií. Skener je pak celkově menší a lépe přenosný.

Superkapacitory také zdokonalují zařízení používané s bateriemi, které mají vysoký vybíjecí výkon. Například PDA (osobní digitální asistent), který užívá Ni-Cd baterie jako zdroj. Použití superkapacitoru by bylo v tomto případě vhodnější. Baterie samotná je adekvátním zdrojem energie pro přenos informace z PDA, avšak má konečnou životnost a bude ji třeba vyměnit. Superkapacitor oproti tomu může fungovat celou dobu životnosti zařízení.



Obrázek č.7 Grafické využití superkapacitoru [Zdroj: ECOM s.r.o.]

1.5. Souhrn

I když nejsou superkapacitory skutečnou náhradou baterií, budou hrát důležitou roli v poskytování “zelenějšího řešení” akumulace elektrické energie. Dnešní superkapacitory v systémech elektronických zdrojů mají dobrý výkon, jsou aplikovatelné a ekonomické. Jsou považovány za rovnocenného partnera pro ostatní možnosti akumulárních zdrojů elektrické energie. I když jsou aplikace superkapacitorů, jako záložní zdroje pro paměť už značně rozšířené, mnoho aplikací je stále ve vývoji. Dalším nástupcem je technologie superkapacitorů s vyšším napětím, jejíž výsledky vývoje jsou jistě dalekosáhlé.

Výhody:

- Vysoký měrný výkon ve srovnání s akumulátory
- Nízký vnitřní odpor
- Vysoký počet pracovních cyklů (až 1 milion)
- Vysoká účinnost (až 98 %)
- Vysoká rychlost nabíjení a vybíjení (řádově sekundy).

Nevýhody:

- Nízká měrná energie ve srovnání s akumulátory – až 10 x nižší než u olověných akumulátorů
- Nízké provozní napětí na článek – nutno sériově propojit a použít vyrovnávací obvod
- Poměrně vysoké samovybíjení v porovnání s akumulátory.[6]

2. Vyrovnávací obvody pro superkapacitory

Sériové spojení a vyrovnávání

Vzhledem k tomu, že samostatný napěťový superkapacitorový článek je poměrně málo využitelný pro většinu požadavků aplikací je proto nutné sériové spojení superkapacitorů k dosažení požadovaného napětí. I když každý superkapacitor bude mít malou toleranci kapacity a odporu je nezbytné vyrovnávání, nebo zamezit jednotlivým superkapacitorům překročení vlastní jmenovité hodnoty napětí. Rozdělování napětí může být dosaženo prostřednictvím dvou různých metod – PASIVNÍ nebo AKTIVNÍ vyrovnávání.

- Pasivní vyrovnávání neutváří změnu v regulaci napětí závislou na stavu superkapacitoru. Nejpoužívanější způsob pasivního vyrovnávání je pomocí rezistorů paralelně zapojených k superkapacitorům.
- Aktivní vyrovnávací zapojení jsou různá. Metoda implementuje vyrovnávací schéma založené na lineárním napěťovém vyrovnávacím režimu. Způsob aktivního zapojení se snaží vyrovnávat dva sousedící sériově zapojené superkapacitory na základě napěťové nevyváženosti. Maximální proud při vyrovnávání se liší podle použitého zapojení.

Obecně platí, že čím větší kapacita, tím náchylnější článek na propojení a zatížení. Zařízení s větší kapacitou mají vnitřní odpor v řádu několika stovek mikrohmů. Špatné propojení pak může mít vliv na zvýšený odpor, ještě větší než je odpor vlastního superkapacitorového zapojení. Větší zařízení budou obecně snášet větší proudy, což vyžaduje spolehlivé propojení článků.

ČLÁNEK – článkem se rozumí jednotlivý superkapacitor.

MODUL – modulem se rozumí sériové propojení více článků dohromady.

2.1. Sériová zapojení – pasivní a aktivní vyrovnávání napětí

Úvod

I když je hustota energie superkapacitoru vysoká, samostatný článek pro většinu aplikací nestačí. Prvním krokem pro definice velikostí veličin obvodu je určení potřebného počtu článků. Musí být definovány dva parametry. Energie, kterou je třeba akumulovat a použít a okamžitý výkon, který musí absorbovat během dobíjení a poskytovat při vybíjení.

Známe-li využitelnou energii W_u pro danou aplikaci a poměr vybíjecího napětí d (tj. poměr mezi napětím na konci vybíjení a maximálním napětím), počet superkapacitorů N_s se dostane z rovnice

$$N_s = \frac{2W_u}{C \cdot U_M^2 \left(1 - \left(\frac{d}{100} \right)^2 \right)} \quad (3)$$

Nemělo by se opomenout, že toto číslo je závislé na kapacitě (superkapacitorů) C a také na maximálním napětí U_M .

Pokud máme definovány energetické nároky a minimální počet článků, potom je třeba zjistit, zda je toto číslo kompatibilní s požadavky na výkon. Energetická účinnost superkapacitoru totiž závisí na výkonu, který musí absorbovat / poskytnout. Ve zvláštních případech se počet článků musí zvýšit kvůli redukci nabíjecího - vybíjecího proudu procházejícího obvodem a tím zvýšit energetickou účinnost.

Následující odstavce uvádějí metody pro pasivní a aktivní zapojení k vyrovnávání napětí na sériovém zapojení superkapacitorů. Tímto řešením je zajištěna optimální hodnota akumulované energie. Základem snižovací a zvyšovací topologie tohoto principu je způsob zapojení, jehož konstrukce a řízení má vysokou efektivitu.

Záložní zdroje energie jsou obvykle založeny na bateriích. Takové komponenty nabízejí velké množství energie, ale s omezeným okamžitým výkonem. Ve srovnání s bateriemi představují superkapacitory jeden z nejzajímavějších směrů vývoje na poli akumulace energie. Superkapacitory nabízejí schopnost dodání vysokého okamžitého výkonu.

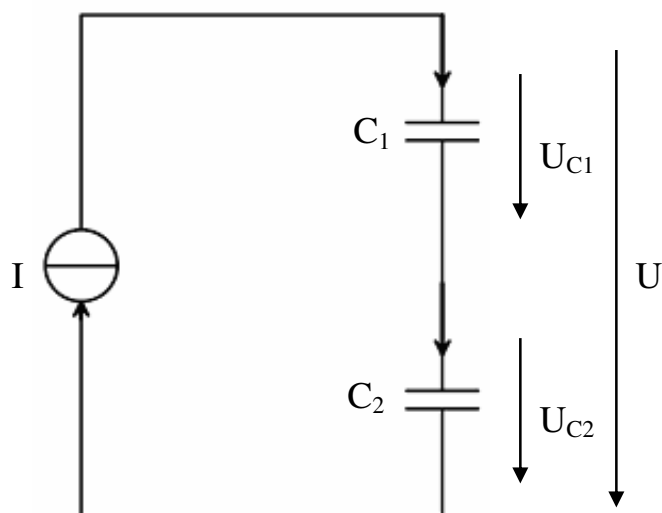
Použití superkapacitorů vyžaduje jejich sériové zapojení, aby se redukovaly příslušné energetické ztráty v přidruženém elektronickém výkonovém měniči. Kvůli odlišnostem v hodnotách jednotlivých superkapacitorů nebude celkové napětí rovnoměrně rozděleno mezi jednotlivé články. Na jednom i více superkapacitorech se může objevit přepětí a akumulovaná energie by pak nebyla optimalizována. Snahou je tedy vytvořit pasivní nebo aktivní zařízení pro rozdělování napětí na jednotlivé superkapacitory v modulu, což brání přepětí, maximalizuje akumulovanou energii a její efektivní využití.

Jednoduše ... proč vlastně vyrovnávat napětí?

- Prvním důvodem je vyhnout se přepětí a zvýšit životnost obvodu.
- Druhým důvodem a výhodou je schopnost akumulovat maximální možné množství energie s ohledem na nevyhnutelný rozdíl v kapacitách jednotlivých článků.

2.2. Sériové zapojení superkapacitorů

Nabíjecí napětí superkapacitorů je díky technologickým omezením nízké cca kolem 2,5 V. Efektivnost související výkonové elektroniky musí být co nejvyšší, protože se využívá v zařízeních pro akumulaci spojeného výkonu. Za účelem redukce výkonových ztrát v elektronickém měniči při vybíjení a nabíjení, je potřeba sériové zapojení několika superkapacitorů ke zvýšení provozního napětí a snížení nabíjecího a vybíjecího proudu, jak je uvedeno na obrázku 8 v zapojení se dvěma superkapacitory.



Obrázek č.8 Sériové spojení superkapacitorů

Kvůli rozdílným hodnotám každého superkapacitoru není celkové napětí sériového zapojení rovnoměrně rozděleno (vyrovnáno). To může vést k asymetrickému rozdělení napětí mezi oba prvky. Pokud tento jev není kompenzován s ohledem na místní přetížení, může se objevit přepětí na některém článku s rizikem destrukce komponentu.

Uvažujme např. sériové zapojení dvou superkapacitorů jako je na obrázku 8, spojených proudovým zdrojem s účelem nabíjet a vybíjet tento systém.

Dosazením d (poměrný rozdíl mezi hodnotou C₁ a C₂ v %) můžeme definovat hodnoty C₁ a C₂ ve srovnání s ideální referenční hodnotou C

$$C_1 = C \quad a \quad C_2 = C \cdot \frac{d + 100}{100} \quad (4)$$

Toto sériové zapojení se považuje za nabitě, pokud je celkové napětí 5 V, protože napětí na člancích musí být omezeno na 2,5 V. Za těchto podmínek a je-li počáteční napětí 0, platí

$$U_{c1f} = \frac{d+100}{d+200} U_f \quad a \quad U_{c2f} = \frac{100}{d+200} U_f \quad (5)$$

U_{c1f} a U_{c2f} jsou napětí prvků C_1 a C_2 na konci nabíjení a U_f je celkové napětí (5 V). Podle uvedených vztahů uvažujeme dva extrémní případy pro $C = 1000 \text{ F}$. První se vztahuje k ideálním superkapacitorům se stejnou kapacitou ($d = 0 \%$). Druhý případ uvažuje superkapacitor C_2 s menší kapacitou ($d = -20 \%$, $C_1 = 1000 \text{ F}$, $C_2 = 800 \text{ F}$). Teoretické výsledky v tabulce 1

	$d = 0 \%$	$d = -20 \%$ nevyrovnáno	$d = -20 \%$ vyrovnáno
$U_f \text{ (V)}$	5	4,5	5
$U_{c1f} \text{ (V)}$	2,5	2	2,5
$U_{c2f} \text{ (V)}$	2,5	2,5	2,5
$E \text{ (J)}$	6250	4500	5625

Tabulka č.1 Rozdělování napětí a akumulovaná energie

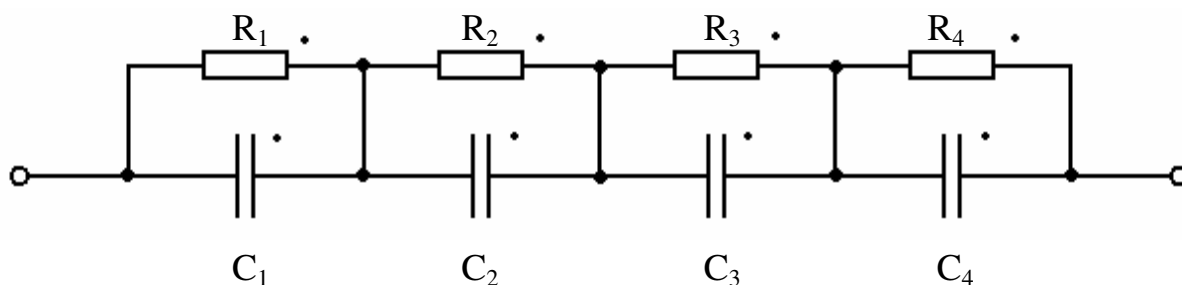
V případě ideálních stejných hodnot kapacity pro jednotlivé články ($d = 0 \%$) je akumulovaná energie 6,25 kJ. Když je $d -20 \%$, napětí nejsou rovnoměrně rozdělena. Aby se zabránilo přepětí, nabíjecí proces je ukončen, jakmile jeden superkapacitor dosáhne maximálního napětí 2,5 V. V tomto případě je nabíjecí proces ukončen, když C_2 je 2,5 V. Napětí na článku C_1 je 2 V, celkové napětí je jen 4,5 V namísto 5 V. Výsledkem je, že naakumulovaná energie je o 28 % nižší než v ideálním případě.

Třetí případ bere v úvahu elektronické zařízení zapojené na každém superkapacitoru, které umožňuje rozdělování dvou napětí U_{c1f} a U_{c2f} . I když je akumulovaná energie stále nižší než 6,25 kJ (kvůli hodnotám C_1 , C_2) je o 20 % vyšší, než v případě $d = -20 \%$ bez vyrovnávacího elektronického obvodu. Hlavní výhodou napěťového vyrovnávacího (rozdělovacího) obvodu je udržování napětí na jednotlivých článcích v jejich jmenovitých hodnotách a bez lokálního přepětí. Akumulovaná energie je v tomto případě na své maximální možné hodnotě, bereme-li v úvahu hodnoty C_1 a C_2 .

2.3. Napěťové vyrovnávací obvody – Pasivní vyrovnávání

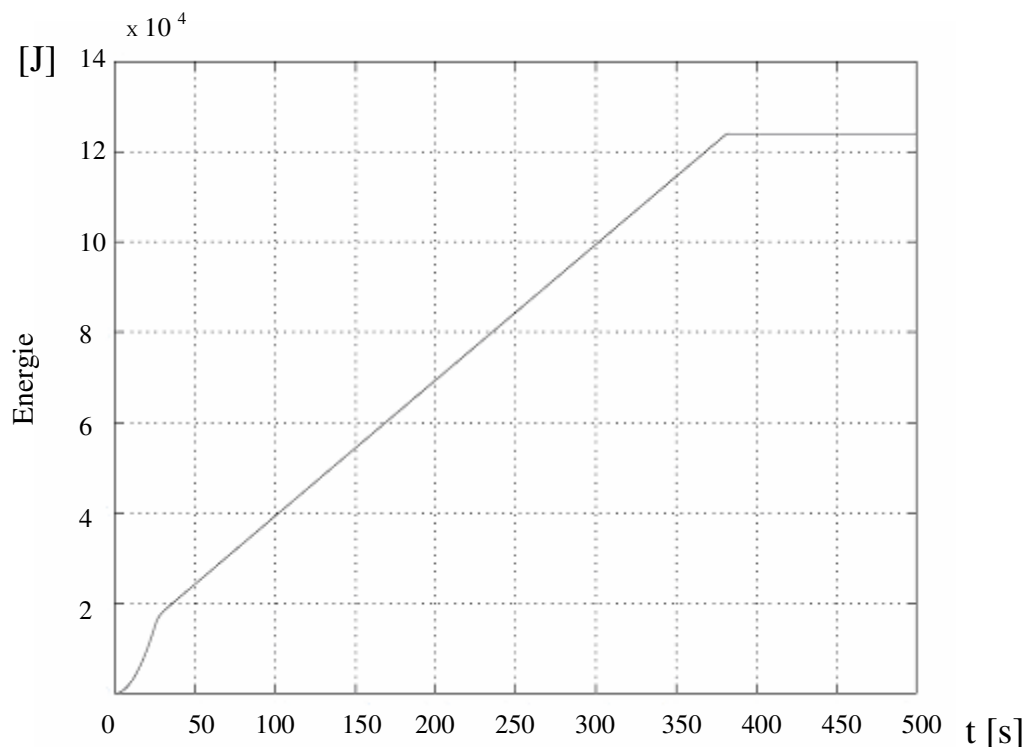
Každý superkapacitor funguje při nízkém napětí v pásmu od 1 do 2,5 V v závislosti na chemickém složení. Články musí být zapojeny v sérii, aby dosáhly požadovaného napětí pro danou aplikaci. Například systém s 2,5 V články pracující s maximem 50 V bude vyžadovat 20 článků zapojených v sérii. V ideálních podmínkách by se každý článek choval stejně jako všechny ostatní a napětí by se rozdělilo stejnými díly mezi všech 20 článků.

Běžný způsob vyrovnávání napětí na sériovém řazení superkapacitorů je zapojení rezistoru na každý z těchto kapacitních prvků. Hodnoty rezistorů závisí na různých kritériích. Hlavním kritériem je kontrolovat průběh dynamicky rozdělovaného napětí tak, aby se rovnal dynamice nabíjecího procesu superkapacitorů. Touto kontrolou dynamického procesu se vyhneme přepětí na jednotlivých prvcích.



Obrázek č.9 Pasivní vyrovnávací obvod s rezistory

Pro ilustraci uvedme obrázek 10 s teoretickým výsledkem, v jehož případě jde o sériové zapojení 5 článků: čtyři jsou o kapacitě 1000 F , pátý kapacity 800 F . Předpokládáme vyvážení energie na konci nabíjecího procesu z hodnoty napětí 0 V na $12,5\text{ V}$ s použitím zařízení pro vyrovnávání napětí. Konečná akumulovaná energie je 15 kJ . Budeme srovnávat tuto referenční energii oproti energii dodanou nabíjecím zařízením.



Obrázek č.10 Energetické nároky: vyrovnávání napětí pomocí rezistorů

Řešení s použitím rezistorů generuje příliš vysoké ztráty. Hodnoty těchto rezistorů ($0,1 \Omega$) byly vybrány pro dobrou dynamiku vyrovnávání napětí. Pokud modul drží po určitou dobu vyrovnané napětí, stane se rozložení potenciálů funkčně závislé na velikosti vnitřního paralelního odporu. V sériovém zapojení superkapacitorů by články s vyšším ztrátovým proudem měly mít nižší článkové napětí a naopak. Jedním způsobem, jak kompenzovat kolísání napětí paralelního odporu je umístit přemostňovací rezistor paralelně s každým článkem, aby velikostí odporu převyšoval hodnotu R_p a omezil tak celkový ztrátový proud článku. To efektivně redukuje kolísání ekvivalentního paralelního odporu mezi články. Bohužel tato dynamika není dostatečně rychlá - nabíjecí proces je ukončen za 40 s, ale trvá 400 s vyrovnat napětí na všech superkapacitorech. Následně musí nabíjecí zařízení dodat téměř 120 kJ k úložné akumulaci 15 kJ v superkapacitorech. Celková účinnost je tedy příliš nízká 12,5 %.

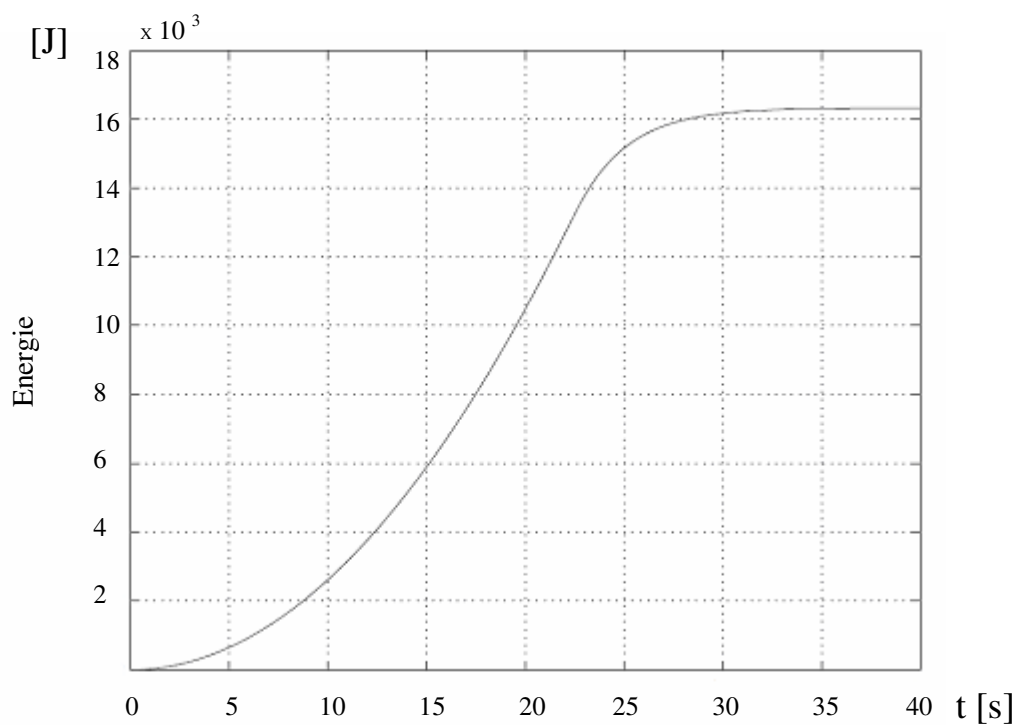
Hlavní nevýhodou tohoto řešení je rozptyl výkonu v každém rezistoru. Ve výsledku tedy můžeme napsat, že pasivní vyrovnávání s použitím rezistorů je nejvhodnější pro aplikace s malým cyklem provozního zatížení, kde je možné tolerovat vyšší ztráty, jako u záložních systémů. Pasivní vyrovnávací systém je navržen tak, aby zvládal vnitřní kolísání ztrátového proudu. Rezistor má většinou hodnotu odporu odpovídající desetinásobku průměrného ztrátového proudu článku. Výhodou tohoto řešení je jednoduchost a nízké náklady. Nevýhodou je pomalá reakce kvůli lineárnímu vztahu ztrátového proudu s napětím a dále kvůli vysokým parazitickým ztrátám díky ztrátovému proudu.

Následující rovnice představuje odhad hodnoty rezistoru pro pasivní vyrovnávací obvody, která závisí na maximálním napětí U_{skmax} a ztrátovém proudu superkapacitoru I_{ztrat} a jejich odpovídající hodnoty jsou $U_{scmax} = 2,8 \text{ V}$, $I_{ztrat} = 5 \text{ mA}$.

$$280 \Omega = \frac{U_{skmax}}{2 \cdot I_{ztrat}} > R(\Omega) > \frac{U_{skmax}}{10 \cdot I_{ztrat}} \approx 50 \Omega \quad (6)$$

Hodnota rezistorů byla stanovena na 50 ohmů, jako kompromis mezi účinností a dobrou vyrovnávací dynamikou napětí.

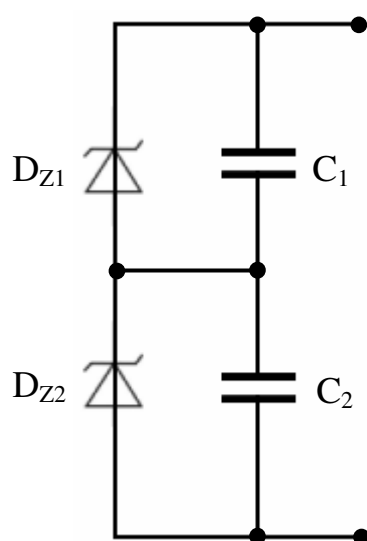
Druhé řešení spočívá v použití Zenerových diod (napěťová regulační dioda), které jsou napojeny přes každý článek. Tyto diody mají omezovat napětí kapacitou, aby maximální hodnota nepřesáhla 2,5 V. Nejsou zde žádné výkonové ztráty, pokud jsou všechna napětí na článcích pod hranicí 2,5 V. Ztrátový výkon však může být významný, pokud více superkapacitorů dosáhne limitního napětí, jak ukazuje obrázek 11.



Obrázek č.11 Energetické nároky: vyrovnávání napětí se Zenerovými diodami

Použití Zenerových diod nabízí lepší účinnost, než zapojení s rezistory. Nabíjecí zařízení poskytuje 16,3 kJ pro výsledných 15 kJ akumulovaných v článcích a s dobrou dynamikou vyrovnávání napětí. Účinnost je téměř 90 %, ale hlavní nevýhodou tohoto řešení se Zenerovými diodami jsou energetické ztráty, které nastávají, když je dosahováno maxim napětí.

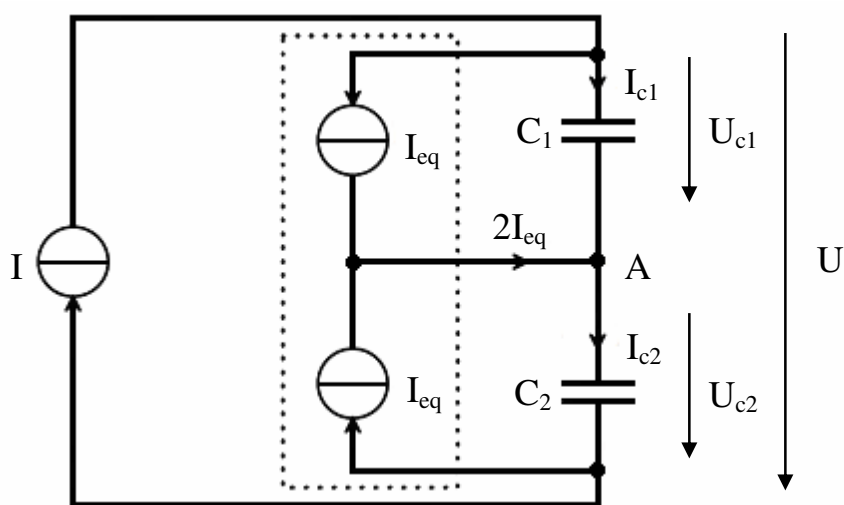
Následný obvod vyrovnává článkové napětí podle Zenerova napětí rozptylem energie do tepelných ztrát. Pro další aplikace nelze však využít napětí a proud ze Zenerových diod.



Obrázek č.12 Pasivní vyrovnávací obvod se Zenerovými diodami

2.4. Napěťové vyrovnávací obvody – Aktivní vyrovnávání

K dosažení ještě lepší účinnosti a snížení ztrát při vyrovnávání jednotlivých napětí se doporučuje využít zapojení, které vychází z topologie na obrázku 13 pro dva superkapacitory. Princip tohoto řešení je založen na odchylce proudu od hlavního nabíjecího proudu I pomocí dvou pomocných proudových zdrojů. V závislosti na rozdílu napětí mezi těmito dvěma články během nabíjecího a vybíjecího procesu, by měla být volena hodnota a vliv vyrovnávacího proudu I_{eq} tak, aby se dosáhlo identické dynamiky vyrovnávání napětí nabíjení nebo vybíjení.



Obrázek č.13 Princip aktivního vyrovnávání

Podle podmínek tohoto zapojení můžeme vyjádřit

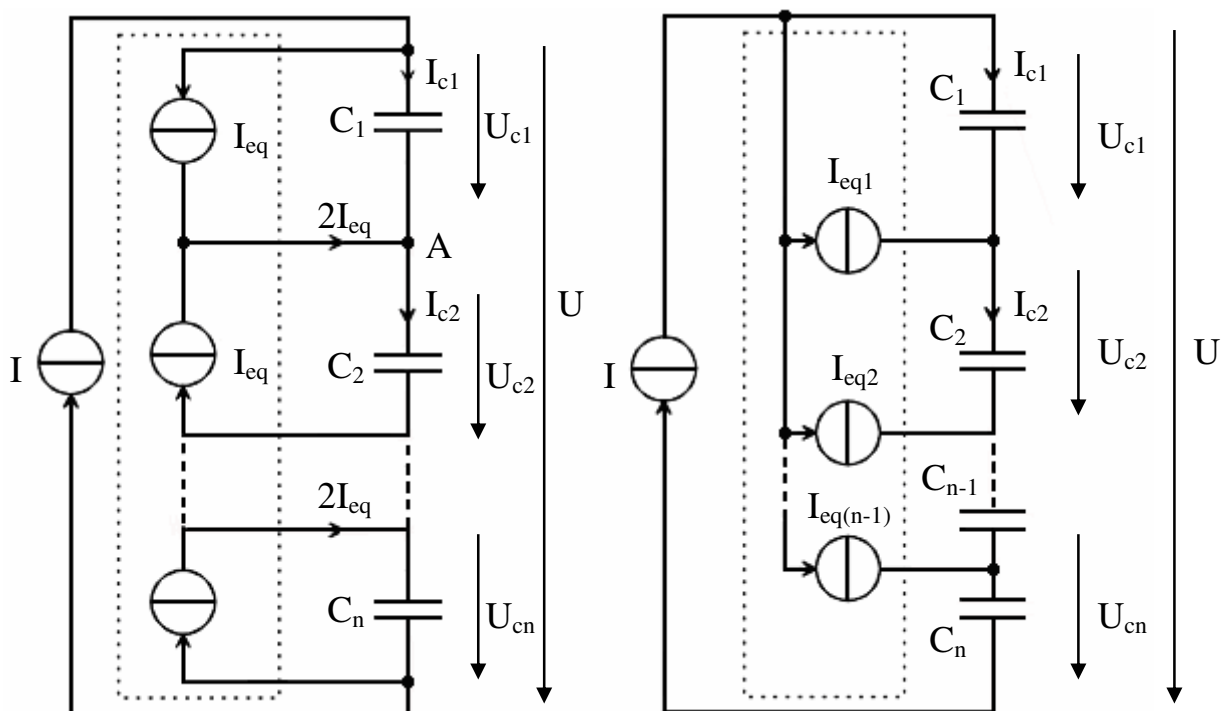
$$I_{eq} = I \cdot \frac{d}{d + 200} \quad (7)$$

Pro získání vyrovnaných napětí na všech sériových zapojeních superkapacitorů musíme myslet na to, že tak jako pro baterie, musí být účinnost obvodu pro vyrovnávání co nejvyšší. To nesplňuje konvenční řešení s paralelním rezistorem ani antiparalelní Zenerovou diodou, zapojených na modulu. Pro vyrovnávací obvody musí být tedy použity aktivní prvky bez energetických rozptylů. Hlavním důvodem jsou velice krátké časové konstanty superkapacitorů (jednotky a desítky sekund) ve srovnání s bateriemi.

Všeobecně mohou být použita dvě řešení pro vyrovnávání napětí na superkapacitorech. Na obrázku 13 jsou ilustrovány principy jejich fungování. Cílem takového zařízení je odebrat energii z článku, který má nejvyšší napětí. Následně je tato energie přesunuta do kapacitoru, kde je nejnižší napětí, pomocí

proudových zdrojů. Metoda využívá principu proudové odchylky hlavního nabíjecího proudu. Toto vyrovnávací zařízení zvládá všechny přesuny energií z nejvíce nabitých obvodových prvků k těm článkům, které vykazují nejnižší úroveň elektrického napětí.

Druhý navržený princip, vpravo na obrázku 14, se liší od prvního tím, že je zde přímé propojení vyrovnávacího zařízení se stejnosměrným článkem, který je využit pro nabíjení modulu. Díky takovému systému je ovšem možné přesunovat napětí z jednoho superkapacitoru na ostatní. Dále můžeme brát energii přímo ze stejnosměrného zdroje a dodávat ji na superkapacitory, kde je nejnižší hodnota napětí ve srovnání s ostatními. Ve finále je také možné využít energii z článků, které jsou nejvíce nabité a vracet ji do stejnosměrného zdroje.



Obrázek č.14 Princip pro vyrovnávání napětí v sériovém zapojení superkapacitorů

2.4.1. Hlavní kritéria pro vyrovnávání napětí

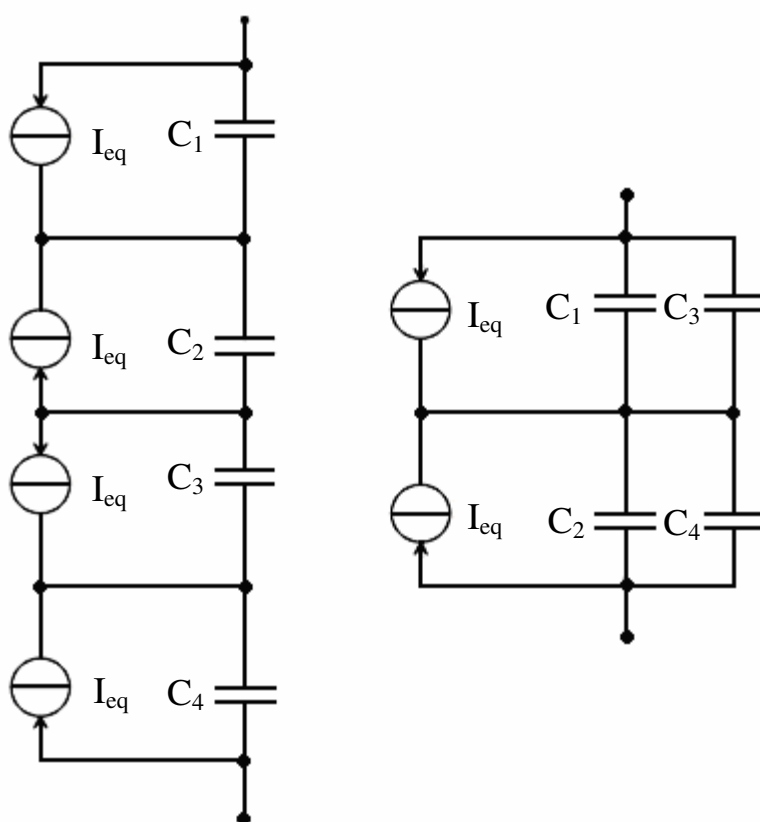
Příčina, proč je třeba znovu se zamyslet nad způsobem, jak je možné získat identická napětí na sériovém zapojení, je přímo spojena se specifiky vlastních superkapacitorů ve srovnání s navrhovaným řešením pro baterie.

Podstatným parametrem je měrná energetická hustota. Proud pro nabíjení a vybíjení zde může běžně dosahovat 100 - 200 A (10 – 20 s pro nabití / vybití). Proto proud I_{eq} potřebný pro vyrovnání napětí může dosahovat vysokých hodnot, aby se dosáhlo dynamiky vyrovnávání odpovídající dynamice nabíjecího procesu. Toto kritérium může být splněno za podmínek plynoucích ze vztahu 7.

Toto však vede k prvnímu problému. Výkonové měniče, které by uskutečnily funkce ilustrované na obrázku 14, budou muset ovládat proudy vysokých hodnot. Nastane tedy problém s účinností.

Druhý problém se váže na počet sériově zapojených superkapacitorů. V případě velkého množství sériově spojených článků bude třeba připojit i adekvátní počet napěťových vyrovnávacích obvodů. To je především finančně nákladné a takovéto dovybavení obvodu, zvyšuje cenu celého modulu. Jednoduchý způsob, jak se vyhnout těmto nevýhodám je omezit množství propojených superkapacitorů, jak ukazuje obrázek 15. Zapojení nalevo je pro 4 sériově spojené články.

Za předpokladu, že každý zdroj proudu je jednoduchý výkonový měnič, pak představuje potřebu 4 měničů. Proud potřebný pro vyrovnání napětí je potom definován vztahem 7 a je hlavně funkcí tolerance určené pro kapacitanci každého superkapacitoru.



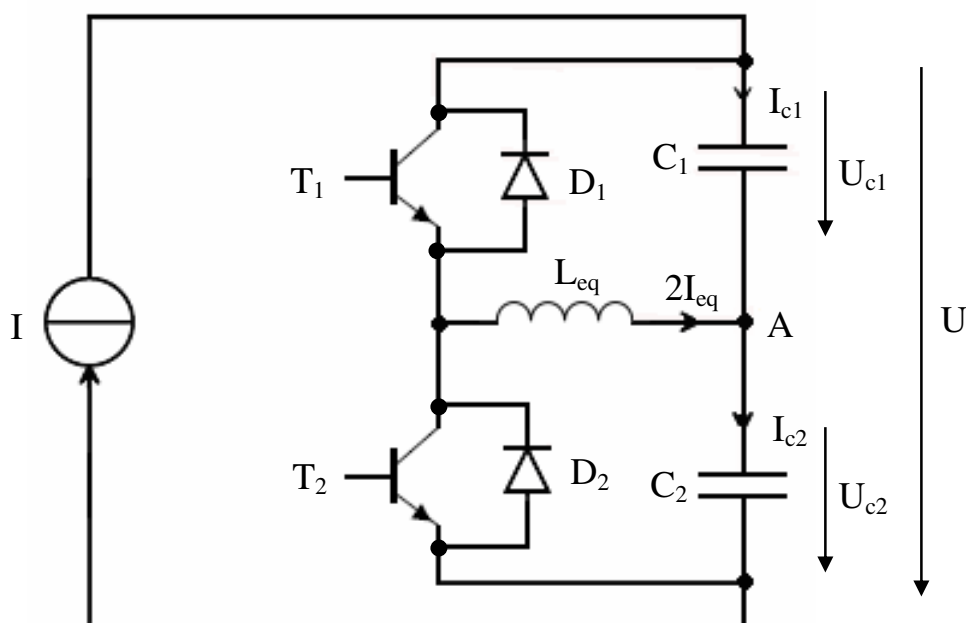
Obrázek č.15 Vliv uspořádání superkapacitorů na vyrovnávání napětí

Další možné zapojení je napravo. Počet superkapacitorů je stále stejný, což znamená, že energie a výkon, který tento modul poskytuje / odebírá je stejný. První výhodou oproti zapojení vlevo je, že počet měničů pro vyrovnávání napětí byl redukován na dva. Oproti tomu tolerance na kapacitancích pro ekvivalentní superkapacity (vytvořených z C_1 a C_2 na jedné straně, C_3 a C_4 na straně druhé) jsou sníženy, protože hodnoty kapacitancí se zprůměrují, tím že jsou v paralelním zapojení. V důsledku toho je rozptylový faktor d redukován i přesto, že příslušné hodnoty kapacitancí C_1 , C_2 , C_3 a C_4 jsou stále stejné. Potom lze snížit proudy potřebné k vyrovnávání napětí. Omezení výkonového měniče modelovaného proudovým zdrojem jsou tedy minimalizovány.

Bylo by také velmi zajímavé sestavit superkapacitorový modul s převládajícím paralelním zapojením článků namísto zapojení sériového. To umožňuje snadnější vyrovnávání napětí a současně menší počet spojených komponentů.

Je evidentní, že celkové napětí takového modulu, bude nízké s problémem vytvořit účinné výkonové rozhraní mezi vlastním modulem a zátěží, pokud je vyžadováno vysoké napětí. Pro tento problém byla navržena různá řešení s použitím výkonových měničů s přechodnou fází o střední frekvenci.

Vztah 7 také ukazuje, že pro nabíjecí proud $I = 100 \text{ A}$, když $C_1 = 1000 \text{ F}$ a $C_2 = 800 \text{ F}$ ($d = -20 \%$), by měl být rozdělovací proud $I_{eq} = -11,1 \text{ A}$. Vyrovnávací proudové zdroje mohou být poskládány jako na následujícím obrázku



Obrázek č.16 Aktivní vyrovnávací obvod

Cílem použití tohoto měniče je dosáhnout vyrovnávání napětí proudovou odchylkou prováděnou přepínáním spínačů tohoto aktivního obvodu. Ve srovnání s předchozími variantami zapojení, toto zařízení přináší lepší účinnost, protože jeho fungování není založeno na ztrátovém výkonu.

Navržené zapojení funguje jako snižovací - zvyšovací měnič s proudovou reverzí. Způsob tohoto zapojení umožňuje přenos energie z C_1 do C_2 (nebo naopak), nezávisle na napětích U_{c1} a U_{c2} . Ve srovnání s obvodem na obrázku 13 byly dva proudové zdroje nahrazeny dvěma tranzistory / diodami. Princip, ale zůstává stejný, jestliže proud v induktoru je dvakrát větší než dříve stanovený proud I_{eq} .

K optimalizaci účinnosti takového zařízení se doporučuje řídit a provozovat měnič v nespojitém pracovním režimu. Měly by nastat dvě rozdílné situace. Když je potřeba kladný (pozitivní) proud $2I_{eq}$ ($U_{c1} > U_{c2}$), tranzistor T_2 je vypnut, T_1 zapínán a vypínán s danou frekvencí. Naopak, když je potřeba záporný (negativní) proud $2I_{eq}$ ($U_{c1} < U_{c2}$), tranzistor T_1 je vypnut, T_2 je zapínán a vypínán se stejnou

spínací frekvencí. Tento přepínací proces začíná, jakmile je detekován výrazný rozdíl napětí mezi C_1 a C_2 . Proces přepínání skončí, jakmile se napětí vyrovnají a jsou shodná.

Když je napětíový rozdíl menší než propustné napětí na diodách a pokud přepínání T_1 a T_2 je definováno jako 50 % cyklus provozního zatížení, tento snižovací - zvyšovací měnič pracuje v nespojitém pracovním režimu. Za těchto podmínek můžeme definovat hlavní konstrukční kritéria takového zapojení s ohledem na vztah, který udává hodnotu potřebného vyrovnávacího proudu I_{eq} , jako funkci hlavního proudu I ,

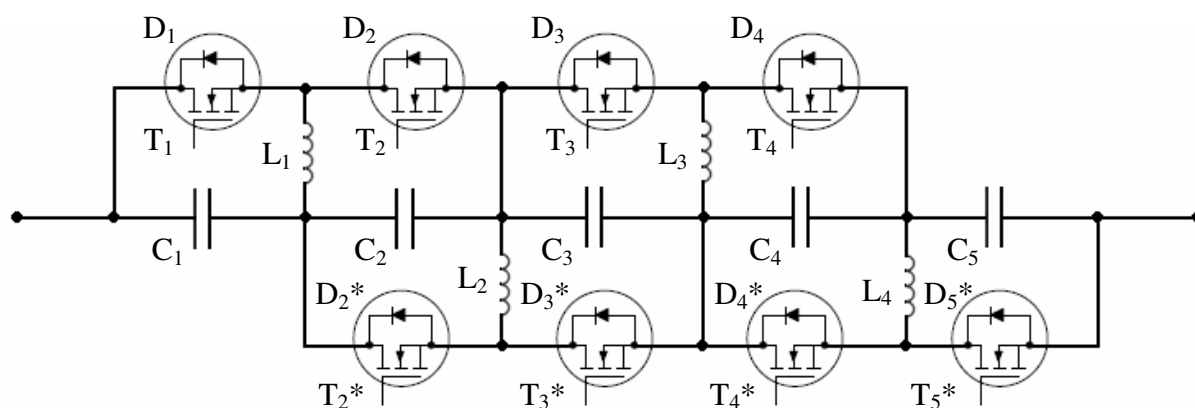
$$L_{eq}f = \frac{1}{16I} \cdot \frac{d+200}{d} \cdot U_{c1} \cdot \left(1 + \frac{U_{c1}}{U_{c2} + U_d}\right) \quad (8)$$

kde f je přepínací frekvence, L_{eq} je hodnota indukčnosti a U_d je propustné napětí diod.

Tento vztah určuje výběr induktoru (cívky) a hodnoty přepínací frekvence pro daný hlavní proud I a pro poměrný rozdíl d superkapacitorů C_1 a C_2 . Pokud je jednou hodnota L_{eq} určena, jsou dva způsoby pro definování přepínací frekvence f :

- f může být nastavena provždy pevně - konstantně. Maximální hodnoty U_{c1} a U_{c2} byly voleny, aby omezovaly hodnotu vyrovnávacího proudu. Během nabíjecího a vybíjecího procesu, by se měla tato hodnota měnit jako funkce napětí U_{c1} a U_{c2} . V důsledku toho bude vyrovnávání napětí neúčinnější, když U_{c1} a U_{c2} dosáhnou své maximální hodnoty.
- f se může měnit jako funkce napětí U_{c1} a U_{c2} . Tento pracovní cyklus uzavřené smyčky zajišťuje konstantní hodnotu vyrovnávacího proudu. Vyrovnávání napětí bude tedy účinné pro jakékoliv U_{c1} a U_{c2} , ale přepínací frekvence f se musí měnit v širokém rozsahu.

Zapojení na obrázku 16 a definovaná hlavní konstrukční kritéria jsou platná pro dva superkapacitory zapojené v sérii, ale mohou být rozšířena pro spojení n článků v sérii, jako je naznačeno na obrázku 17 pro pět superkapacitorů v sériovém zapojení.



Obrázek č.17 Aktivní vyrovnávací obvod pro 5 superkapacitorů

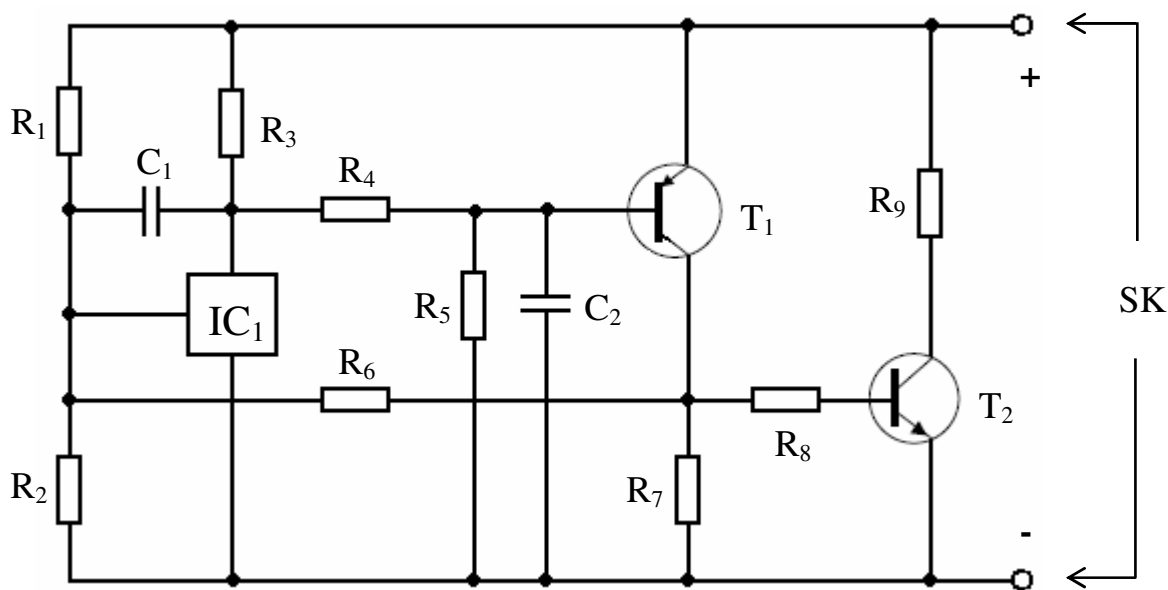
Toto sériové zapojení je rozděleno na sdružení po dvou superkapacitorech. Snižovací - zvyšovací měnič je zapojen pro každý pár superkapacitorů. Měnič $T_1 D_1 T_2 D_2$ umožňuje vyrovnávání napětí C_1 a C_2 . Měnič $T_2' D_2' T_3' D_3'$ pro C_2 a C_3 atd. Stejná kritéria pro zapojení jsou použita pro každý měnič. Jestliže je hlavní proud $I = 100 \text{ A}$, pro $d = 20 \%$, hodnoty všech induktorů musí být $3 \mu\text{H}$, když je přepínací frekvence 10 kHz . Pro ilustraci jsou ukázány výsledky teoretických předpokladů pro 5 článků v sériovém zapojení. Každý je 1000 F článek, kromě jednoho s 800 F .

Každý typ tohoto vyrovnávacího obvodu má aktivní spínací prvky, jako bipolární nebo MOS-FET tranzistor, zapojené v sérii s dalším vyrovnávacím obvodem. Klíčovým spínacím a řídicím prvkem jsou obvody pro porovnávání napětí (IC1), které započnou svou funkci, pokud potenciál na určitém superkapacitoru klesne pod hodnotu jmenovitého pracovního napětí článku. Obrázek 18 ukazuje schéma aktivního vyrovnávacího obvodu s diverzním nabíjecím proudem.

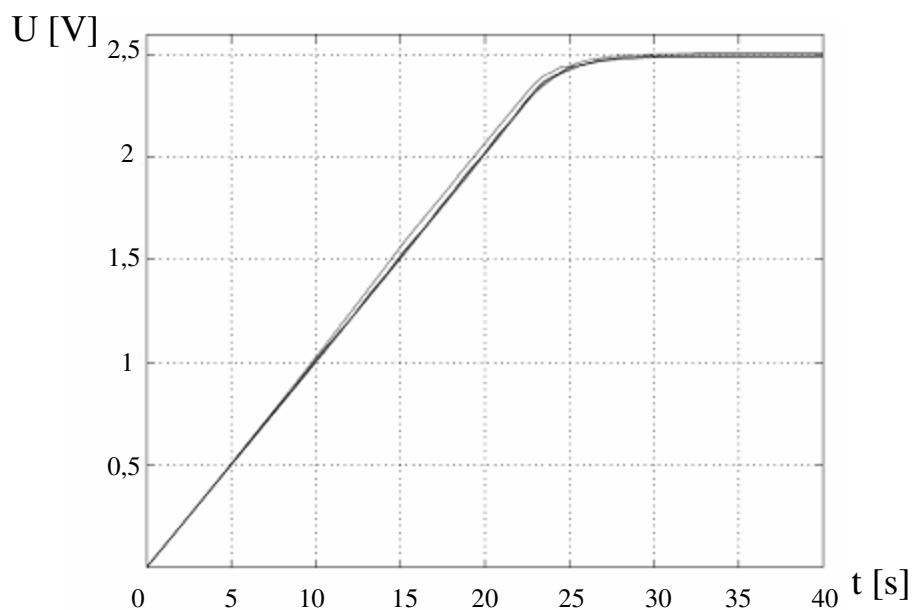
První výsledek, který je na obrázku 19 ukazuje, jaká jsou napětí na jednotlivých superkapacitorech během nabíjení. I když není vyrovnávání okamžité, všechna napětí jsou na konci měření stejná a neobsahují přepětí.

Druhý výsledek ukazuje obrázek 20, kde jsou napětí aplikovaná na induktor a proud v tomto induktoru, když je započat proces vyrovnávání napětí.

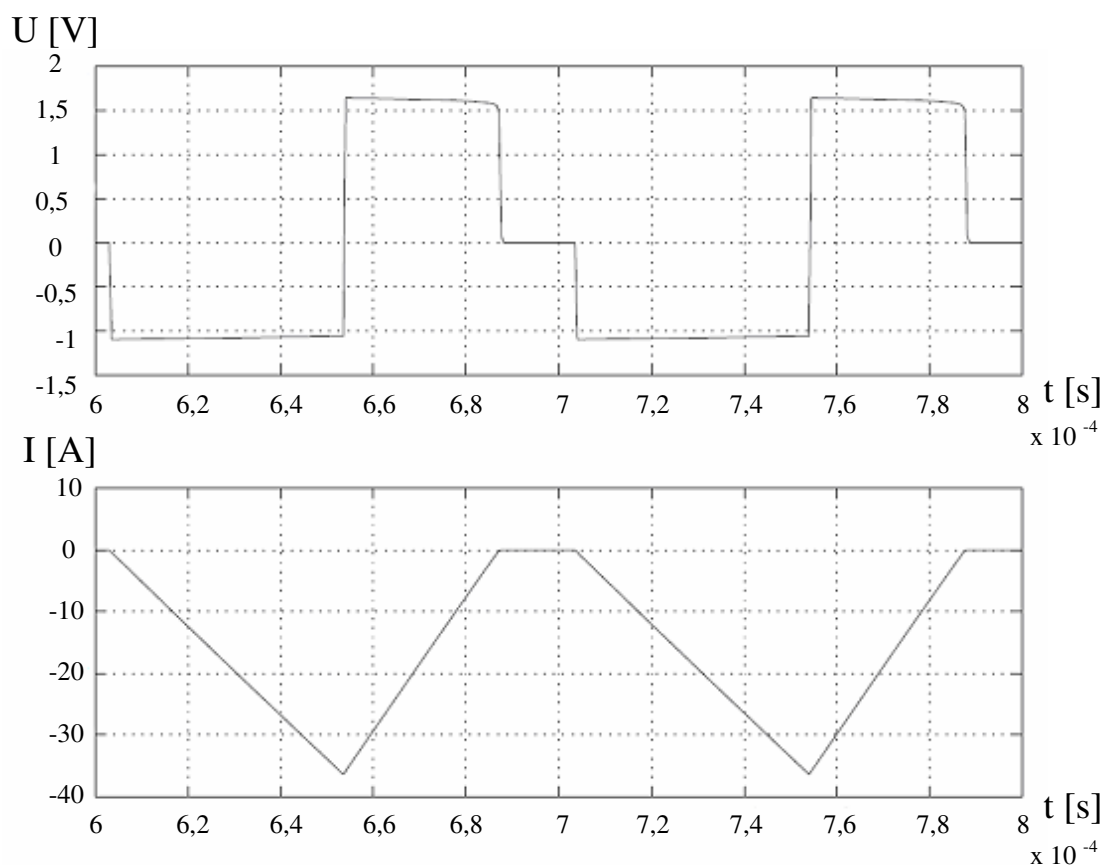
Zmíněný měnič pracuje v nespojitém pracovním režimu. Tzn., že špičkový proud by měl být podstatný a mít pevnou střední hodnotu, jak již bylo napsáno v návrhových kritériích. Můžeme také srovnat hodnoty energie, dodanou nabíjecím zdrojem a energií výsledně akumulovanou v superkapacitorech s přihlédnutím na výkonové ztráty v polovodičích. Ukazuje se zde účinnost 97% , což je nejvyšší dosažená ve srovnání s ostatními řešeními vyrovnávání napětí.



Obrázek č.18 Aktivní vyrovnávací obvod



Obrázek č.19 Aktivní vyrovnávání na 5 superkapacitorech



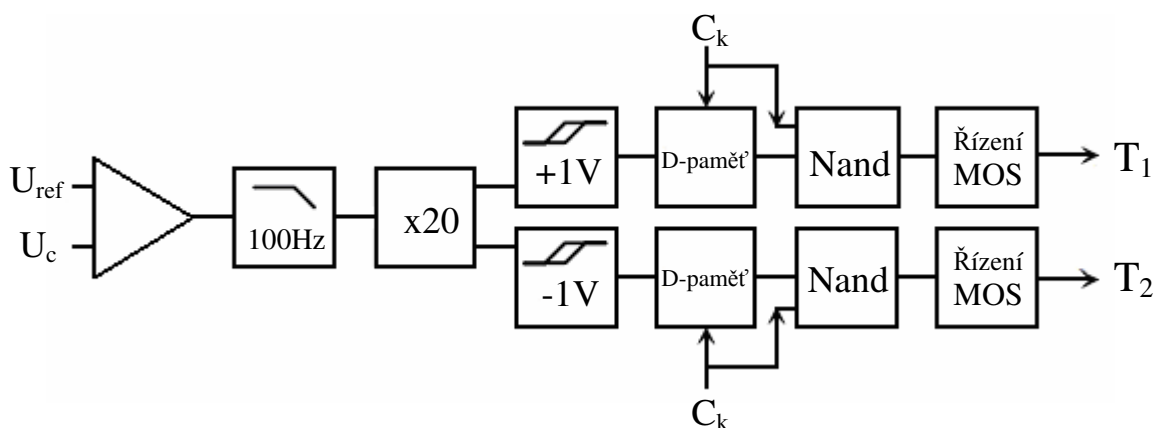
Obrázek č.20 Napětí a proud na induktoru při vyrovnávání napětí

Můžeme tedy navrhnout například modul 5 superkapacitorů po 12 V. Čtyři z nich jsou články s 800 F a jeden je 1000 F k testování případu s disperzí $d = 20 \%$.

Maximální napětí pro každý článek může být nastaveno na 2,3 V. Protože 12 V nelze dosáhnout bez vyrovnávání (napětí na některém kapacitoru přesáhne 2,3 V) pro měření byl použit postup s nižším

nabíjením. K dosažení co nejlepší účinnosti, by pro aktivní obvod měly být zvoleny tranzistory s co nejnižší hodnotou R_{dson} (např. $4\text{ m}\Omega$ - MOS tranzistor). Pro výrazně nižší přepínací ztráty jsou potřebné ultrarychlé diody s krátkou dobou zotavení.

Pro udržení vysoké hodnoty proudu s nízkou frekvencí musí být velikost indukčnosti velmi malá (kolem $5\text{ }\mu\text{H}$). Jak je popsáno v úvodu, tranzistory jsou řízeny po párech, aby vyrovnávaly napětí na spojených dvojicích superkapacitorů. Řídící struktura pro dva tranzistory je na následujícím obrázku



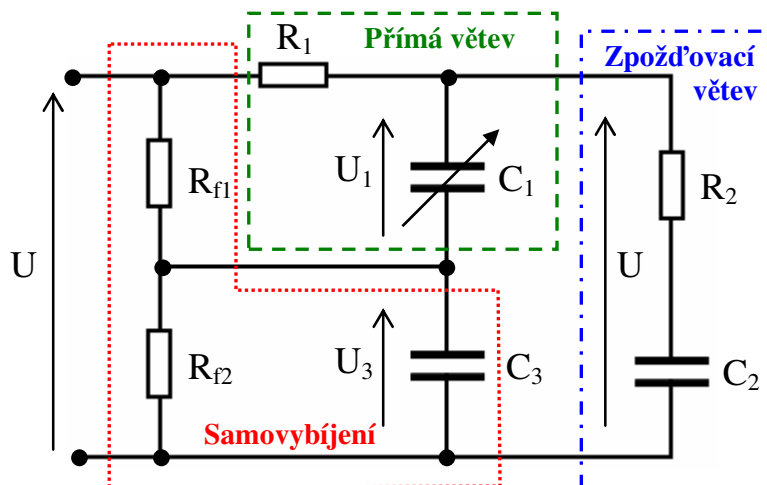
Obrázek č.21 Řídící struktura

Spínací frekvence během nabíjení / vybíjení je konstantní. Vyrovnávací proud kolísá až do maxima, kdy jsou napětí na superkapacitorech maximální. Tato struktura má dobrou přesnost (cca $\pm 20\text{ mV}$), není citlivá na šum a napěťová úroveň na superkapacitoru je odečtena, než se tranzistor sepne. Elektronické obvody byly upraveny pro unipolární řízený zdroj. Pokles napětí ovlivňuje hodnotu vyrovnávacího proudu. Z tohoto důvodu není dobré vyrovnávat na začátku nabíjení. Když celkové napětí modulu vzroste na 3 V (skoro 600 mV na každém superkapacitoru), integrovaný zvyšovací měnič zajistí 15 V zdroj pro řídicí obvody, které mohou spustit vyrovnávání.

V praxi je možné sériové zapojení většího množství takovýchto dvojic článků. Díky jejich konstrukci je napěťové vyrovnávání zabezpečeno i mezi nimi navzájem. Tím se stává sériové zapojení většího počtu superkapacitorů akumulačním systémem s vysokou úrovní uchovávaného nebo dodávaného napětí. Výsledky vyrovnávání napětí lze odvodit tak, že průměrná hodnota proudu induktoru je dle očekávání přímo úměrná napěťovému poklesu na superkapacitoru. Tento fakt zajišťuje správné vyrovnávání napětí.[1]

Model superkapacitoru a účinnost napěťového vyrovnávacího obvodu

Model superkapacitoru (Maxwell 2600F 2,5V) se skládá z přímých a zpožděných větví, dále z komponentů s vlastním vybíjením. Zahrnuje svodový odpor (R_{f1}) a oxidačně redukční odpor (R_{f2}), jak zobrazuje následující obrázek

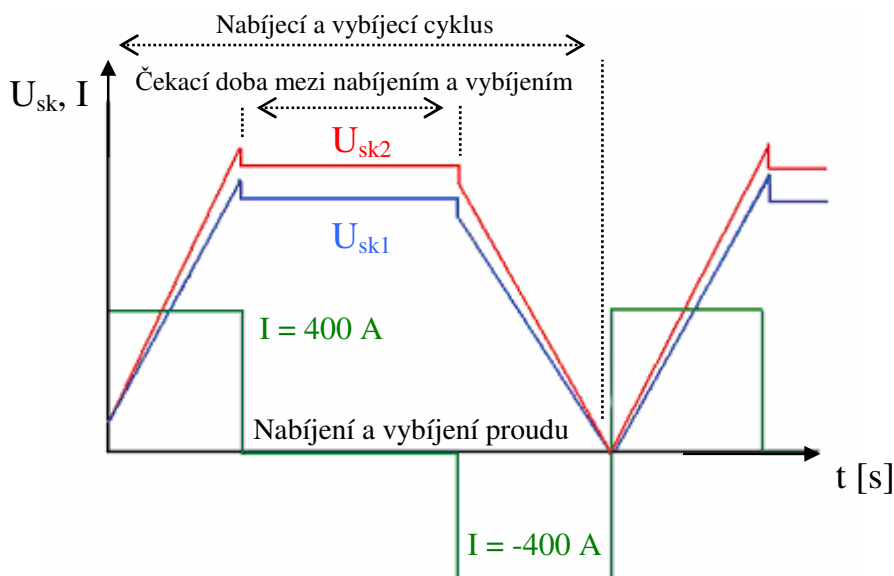


Obrázek č.22 Ekvivalentní obvodový model superkapacitoru Maxwell 2600F 2,5V

Pro srovnání výkonu vyrovnávacích obvodů je možné účinnost modulu definovat rovnicí,

$$\eta = \frac{W_{sk} - W_{ekv}}{W_{sk}} \quad (9)$$

kde W_{sk} je energie akumulovaná v superkapacitoru a W_{ekv} je energie ztrátová v napěťově vyrovnávacích obvodech.



Obrázek č.23 Napětí článků s přepínacími vyrovnávacími obvody

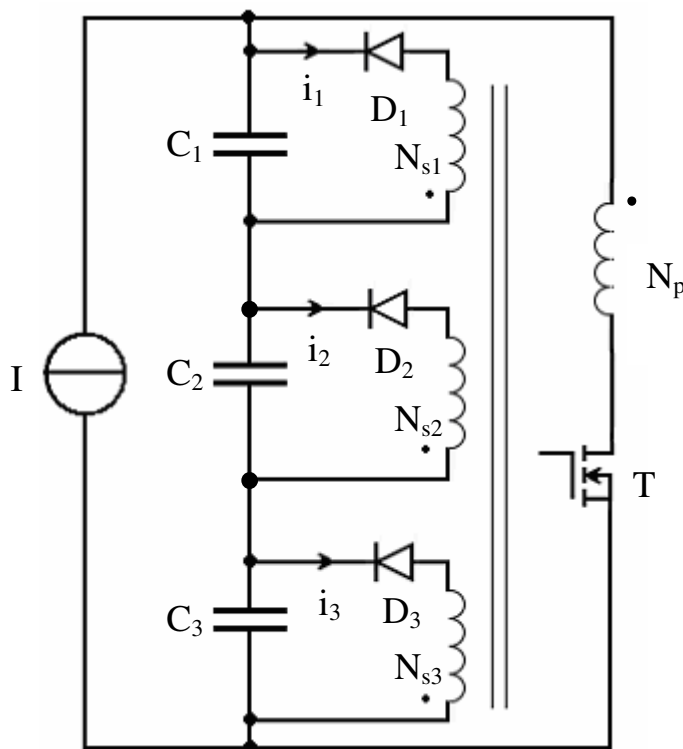
Kvůli odchylkám parametrů superkapacitorů se napětí na člancích rozděluje nerovnoměrně během cyklů vybíjení / nabíjení. Na superkapacitoru se může objevit přepětí. K přerozdělení a vyrovnaní napětí se zapojují různé vyrovnávací obvody, které mají tyto dva koncepty: ztrátové a neztrátové.

Řešení pro vyrovnávání napětí bez ztrát

Jakmile byl vysvětlen princip vyrovnávání napětí, pak je nutné najít způsob jak tuto teorii implementovat do praxe. Existují různá řešení, která byla definována již pro sériová zapojení baterií. V dalších odstavcích jsou navržena tři další různá zapojení pro vyrovnávání napětí v sériovém zapojení superkapacitorů. Aby bylo srovnání jednodušší, použijeme přístup pomocí komplexní modelovací metody založené na EMR (vyjádření pomocí energetického makromodelu = energetické makroskopické znázornění). Tato metodika byla vyvinuta pro analýzu a řízení vícenásobného měniče.

2.4.2. Blokuující stejnosměrný měnič s rozděleným sekundárem

První varianta obvodu pro vyrovnávání napětí v sériovém zapojení superkapacitorů.

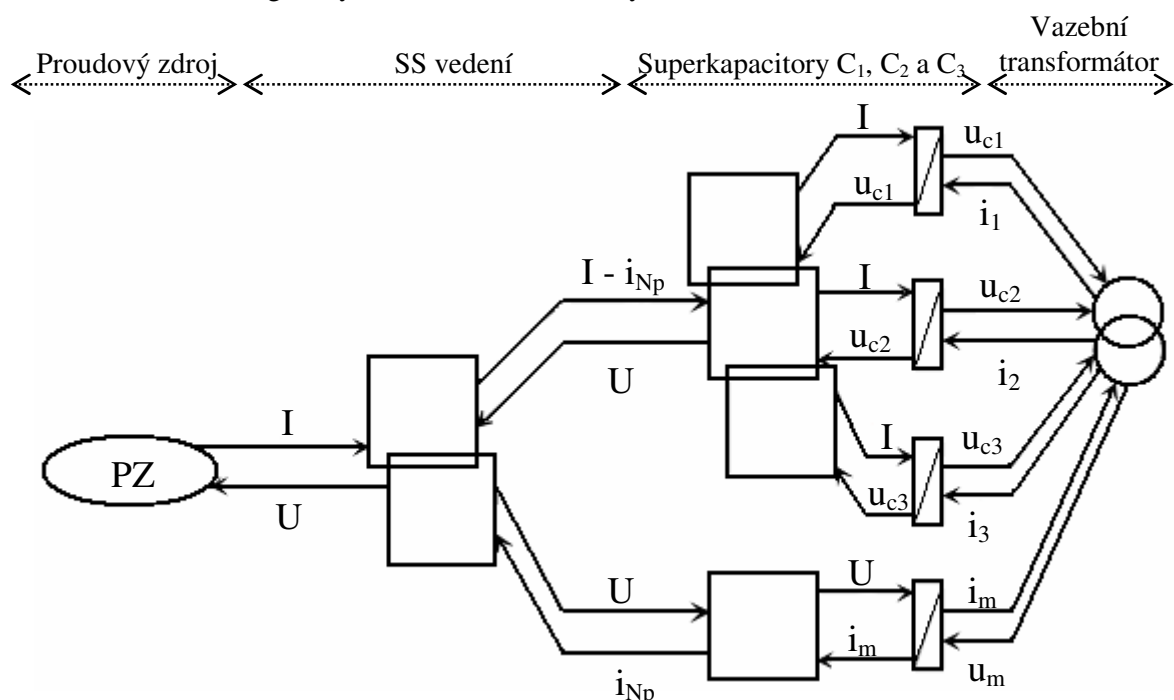


Obrázek č.24 Vyrovnávání s blokujícím DC-DC měničem s rozděleným sekundárem

Cílem tohoto řešení je definovat centralizovaný vyrovnávací měnič. Transformátor v tomto zapojení využíváme pro přímý přenos energie. Jakmile je zaznamenán výrazný rozdíl napětí na některém

ze superkapacitorů sepne tranzistor T, aby akumuloval elektrickou energii do magnetické cívky (induktoru) transformátoru. Když je tranzistor T zavřen, tato energie je přesunuta přes diody do rozděleného sekundáru transformátoru. Většina této energie je poskytnuta těm superkapacitorům, které vykazují nejnižší napětí. Vyrovnaná napětí na jednotlivých člancích odpovídají shodné době vedení diod. Vyrovňovací proces pak může být zastaven.

Tranzistor T musí být navržen tak, aby držel celkové napětí superkapacitorového modulu a maximální hodnotu magnetizačního proudu definovanou podle spínací frekvence a střídy řídicího signálu tranzistoru T. Diody musí být vybrány tak, aby vyhověly především pak pro závěrné napětí, součet maximálního napětí na modulu plus hodnotu napětí na napojeném článku. Během vlastního fungování musí v nejhorším případě udržovat i maximální hodnotu magnetizačního proudu. Model takového vyrovňovacího měniče, s použitím formalizace EMR, je popsán na následujícím obrázku k účelu identifikace energetických vazeb v takovémto systému.



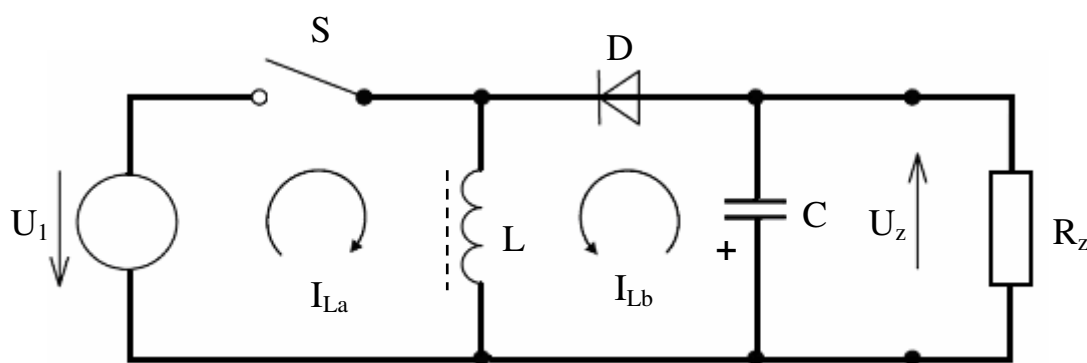
Obrázek č.25 Makromodel blokujícího napětového vyrovňávání s rozděleným sekundárem

Toto znázornění je současně užitečné k pochopení hlavního problému v zapojení blokující struktury pro napětové vyrovňávání. Tento model fakticky prezentuje dva hlavní nezávislé obvody: první je vlastní sériové zapojení superkapacitorů a druhý je blokující měnič. Vazba mezi těmito dvěma elementy je realizována díky transformátoru, který bude rozdělovat svoji magnetizační energii v člancích. Tento transformátor musí být navržen se symetrickými svodovými (rozptylovými) induktory, aby se dosáhlo symetrických vyrovňovacích proudů. Asymetrie některých svodových induktorů může vést k nevyrovnaným napětím, které nebude schopno řízení blokujícího měniče kompenzovat.

Makromodel na obrázku 25 také ukazuje, že řešení vyrovnávání se vztahuje k principu definovanému v levé části obrázku 14. V tomto případě je elektrická energie brána ze stejnosměrného zdroje a přímo distribuována na každý superkapacitor, který potřebuje vyrovnávání.

Invertující měnič

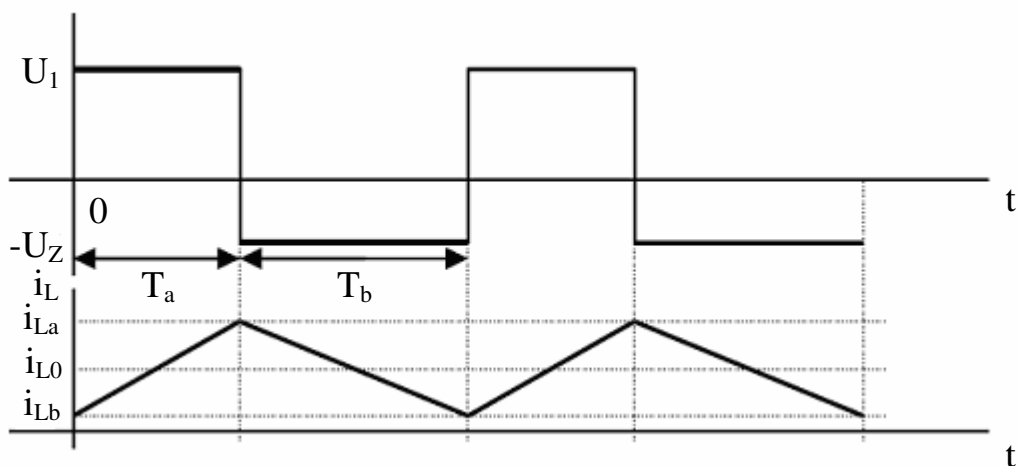
Jednou z možností zapojení měničů bez transformátoru je invertující měnič. Energie je shromažďována buďto v elektrickém poli kondenzátoru nebo v magnetickém poli tlumivky. V základním zapojení využívá invertující měnič akumulaci tlumivky L , v níž se hromadí energie po dobu T_a a po dobu T_b se převádí přes usměrňovač do výstupního obvodu, jak je vidět na následujícím obrázku.[7]



Obrázek č.26 Schéma invertujícího měniče

Po sepnutí spínače S cívkou začne lineárně narůstat proud I_{La} (za předpokladu, že má cívka zanedbatelný ohmický odpor) – časový interval T_a . Na konci tohoto intervalu dosáhne přírůstek proudu na cívce L hodnoty

$$\Delta I_{La} = \frac{U_1}{L} \cdot T_a \quad (10)$$



Obrázek č.27 Průběhy napětí a proudu u zapojení invertujícího měniče

V cívce je nahromaděná energie a řídící obvod rozpne spínač – časový interval T_b . Nyní teče cívkou proud I_{Lb} , který přes diodu D nabíjí kondenzátor C na napětí U_z .

Proud cívkou lineárně klesá

$$\Delta I_{Lb} = -\frac{U_z}{L} \cdot T_b \quad (11)$$

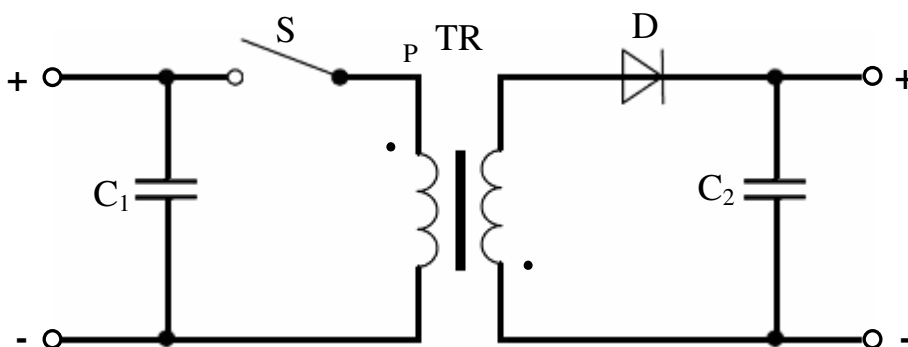
Ze zákona o zachování energie plyne

$$\Delta I_{La} = -\Delta I_{Lb} \quad (12)$$

Po dosazení do předešlých vztahů dostaneme vztah pro výstupní velikost napětí

$$U_z = -U_1 \cdot \frac{T_a}{T_b} \quad (13)$$

Výstupní napětí má opačnou polaritu než napětí vstupní a je nezávislé na odebíraném proudu. V praxi se častěji využívá modifikace zapojení, kde cívku nahradíme transformátorem – pak je toto zapojení označováno jako **blokující (akumulující) měnič – FLYBACK**. Získáme tím galvanické oddělení, které je nutné z hlediska bezpečnosti.

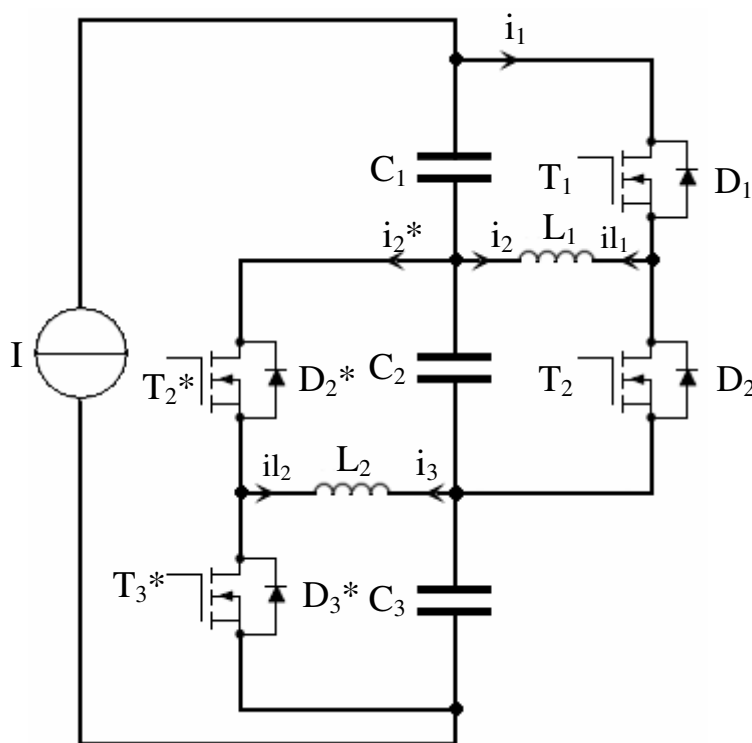


Obrázek č.28 Schéma blokujícího měniče

Mezi výhody tohoto zapojení patří jednoduchost obvodového řešení, malý počet součástek a potřeba pouze jedné cívky. Jistou nevýhodou je nutnost stejného dodání a odebrání energie z magnetického obvodu, středně velké rušení vyzařováním do okolí a větší ztráty transformátoru. Měnič je určen pro výkony s širokým rozsahem výstupního napětí.

2.4.3. Proudový rozdělovač užívající propojených snižovacích - zvyšovacích měničů

Základním principem předešlého řešení bylo zaprvé akumulovat elektrickou energii a zadruhé ji distribuovat do potřebných superkapacitorů. Model tohoto řešení je na obrázku 29, kde je zapojení bez transformátoru s použitím snižovacího - zvyšovacího stejnosměrného měniče. Cílem takového zapojení je umožnit vyrovnávání napětí na dvou následných sériových superkapacitorech prostřednictvím proudové odchylky. Toto chování teoreticky popisuje levá část schématu na obrázku 14. Uvedený reverzní snižovací - zvyšovací měnič je zapojený na jednotlivé páry superkapacitorů. Každý měnič v tomto zapojení umožňuje přenos elektrického napětí mezi jeho dvěma připojenými články, nezávisle na jejich vlastních napětích. Vyrovnávání napětí je prováděno na jednotlivých dvojicích superkapacitorů. K optimalizaci účinnosti zařízení pro vyrovnávání napětí pracuje každý měnič v nespojitém pracovním (vodivostním) režimu, aby se redukovaly spínací ztráty na diodách. Maximální napětí, které spínače (tranzistory a diody) musí zvládnout zpracovat, je dvojnásobek maximálního napětí na článcích ($2 \times 2,5 \text{ V}$). Pro takové aplikace se tedy hodí MOS-FET tranzistory s nízkým odporem v sepnutém stavu R_{DSon} a pro minimalizaci ztrát vedením proudu (kondukčních).

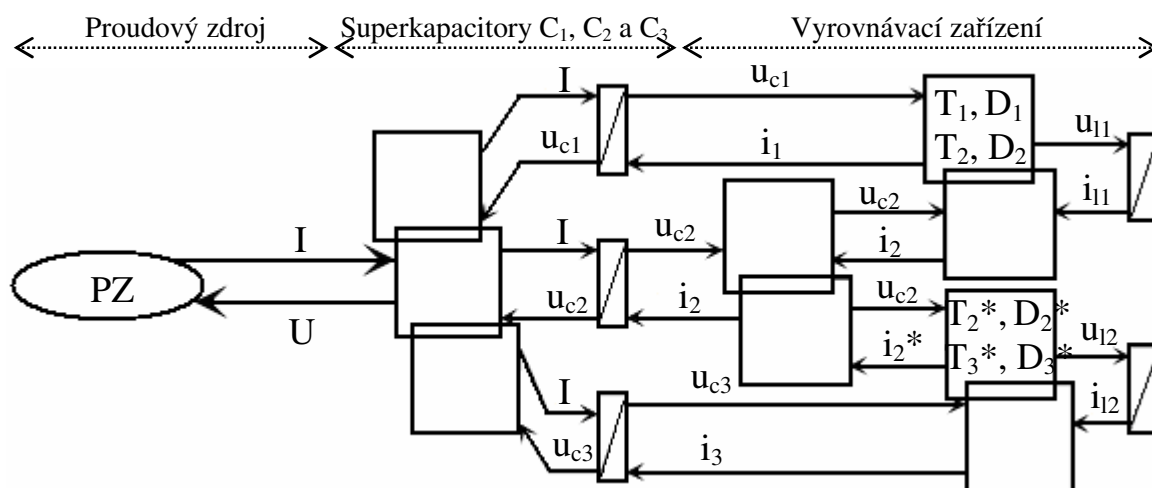


Obrázek č.29 Vyrovnávání napětí pomocí spojených snižovacích – zvyšovacích stejnosměrných měničů

Proudy potřebné pro správné vyrovnávání napětí jsou nastaveny díky spínací frekvenci a střídě měničů. Avšak v mnoha případech je střída nastavena konstantně na 50 % a vyrovnávací proudy jsou

upravovány podle spínací frekvence. Když jsou všechna napětí shodná mohou následně všechny měniče ukončit svoji činnost.

Model takového vyrovnávacího měniče s použitím formalizace EMR, k identifikaci různých energetických vazeb v systému je popsán na následujícím obrázku



Obrázek č.30 Makromodel snižovacích – zvyšovacích měničů pro vyrovnávání napětí

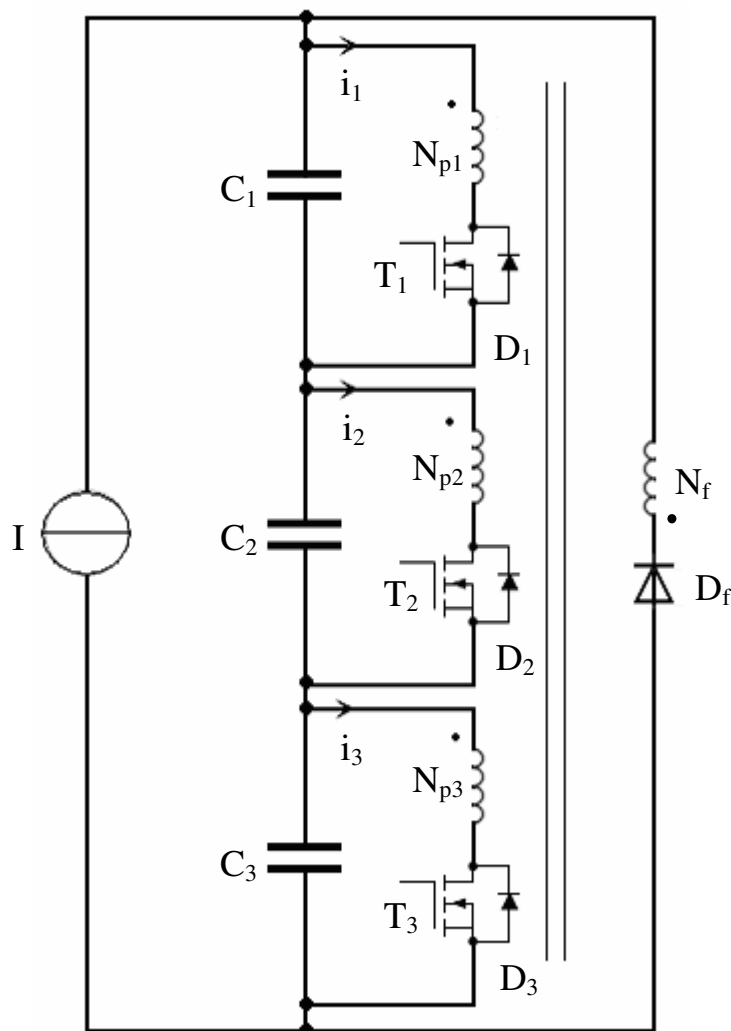
Toto znázornění ukazuje dvě různá spojení. První se vztahuje k vlastnímu sériovému zapojení superkapacitorů. Druhé ukazuje spojení dvou na sebe navázaných článků jdoucích k jednomu snižovacímu - zvyšovacímu měniči. Následně pak induktry potřebné pro výkonový měnič. Princip spočívá v tom, že když je superkapacitor příliš nabitý, energie se z něj odebere a je prvně akumulována v induktoru připojeného snižovacího - zvyšovacího měniče. Dále je tato energie přesunuta do druhého superkapacitoru spojeného s tím stejným měničem.

Hlavní nevýhoda tohoto řešení nastává v případě, kdy musí být napětí převedeno z C_1 na C_3 . Pro uskutečnění musí být použity dva výkonové měniče a C_2 se musí použít na přenos této energie z induktoru L_1 na L_2 . Je tak potom nemožné realizovat přímý přenos napětí z C_1 na C_3 . Účinnost takového vyrovnávání napětí je potom výsledkem účinnosti dvou výkonových měničů. Tento problém může být například pro velká sériová spojení ohromný, pokud dochází k přenosu energie z prvního na poslední článek.

Velkou výhodou však je, že toto řešení nabízí velmi flexibilní přístup, protože každý snižovací - zvyšovací měnič je schopen pracovat nezávisle na ostatních.

2.4.4. Proudový rozdělovač s použitím propustných stejnosměrných měničů a rozděleným primárem

Další alternativa pro vyrovnávání napětí superkapacitorů je na obrázku 31, kde jsou kombinovány největší výhody dvou předchozích řešení.

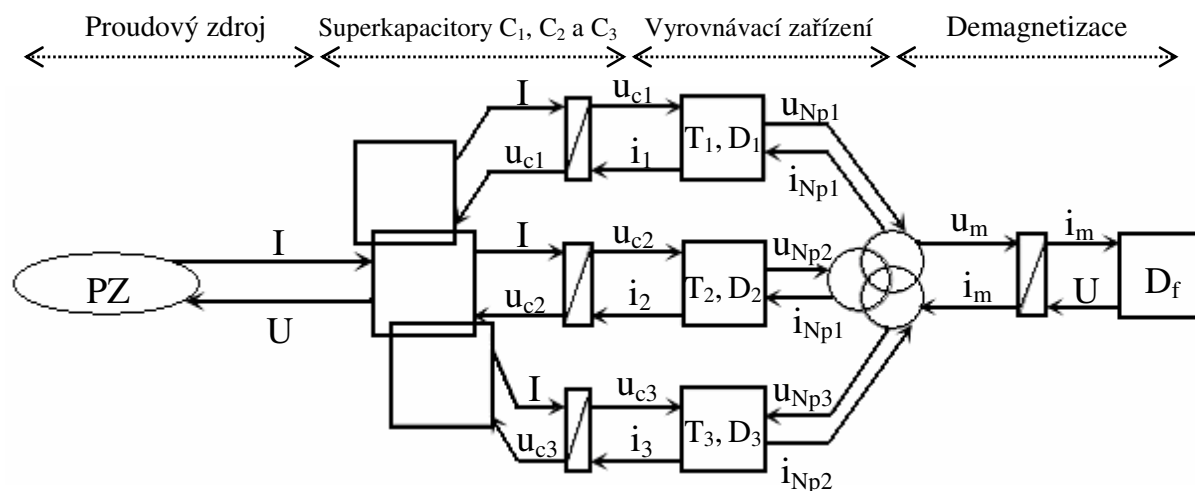


Obrázek č.31 Napětíové vyrovnávání s propustným stejnosměrným měničem a rozděleným primárem

Jak je obecně popsáno ve schématickém znázornění na obrázku 14 vpravo, energie potřebná pro vyrovnávání napětí se neodebírá z hlavního stejnosměrného zdroje. Výkonový měnič je spojený s jednotlivými superkapacitory. Potom bude tedy napětí odebíráno na superkapacitorech, které vykazují nejvyšší napětí a dodáváno na články, kde je napětí nejnižší. Jakmile bude detekováno na superkapacitoru napětí vyšší než na ostatních, dojde k sepnutí připojeného tranzistoru. Energie je z tohoto místa přesunuta na ostatní částí obvodu přes transformátor a jejich příslušné diody. V transformátoru nedochází k žádné akumulaci, energie je přímo přenášena. U propustných měničů musí být poslední vinutí (N_f) provedeno k demagnetizaci transformátoru. Proud potřebný pro účinné

napěťové vyrovnávání můžeme nastavovat prostřednictvím spínací frekvence na tranzistorech a jejich střídou. Pak ale musíme vzít v úvahu čas, který je vyžadován pro celkovou demagnetizaci transformátoru.

Model takového vyrovnávacího měniče s užitím formalizace EMR, je na následujícím obrázku



Obrázek č.32 Makromodel přímého stejnosměrného měniče s rozděleným primárem

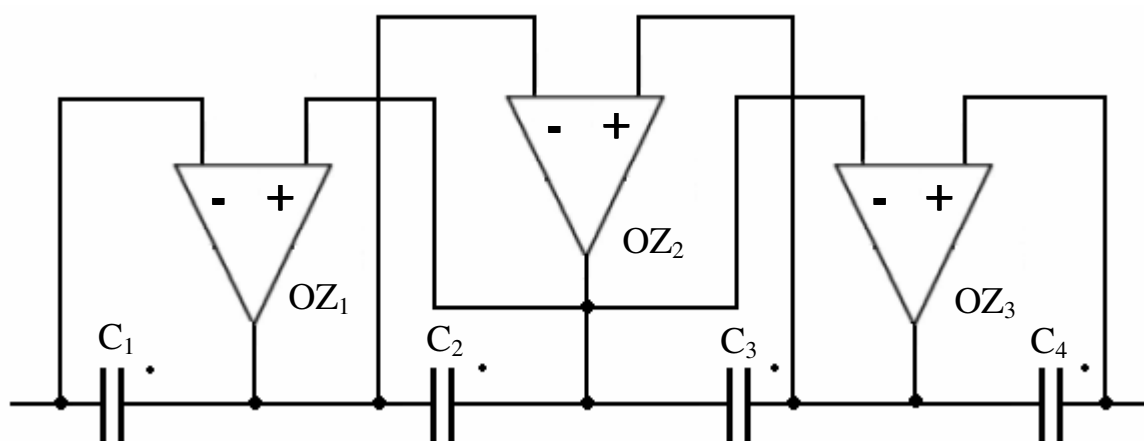
Tento uvedený makromodel poukazuje na dvě různé vazby. První se váže k vlastnímu sériovému zapojení superkapacitorů. Druhá vazba se týká transformátoru, přes který jsou výkonové měniče propojeny s články. Zobrazení makromodelu ilustruje hlavní výhodu společně s hlavní nevýhodou tohoto řešení.

Výhodou je, že každý superkapacitor zůstává připojen k transformátoru. Díky tomu je možné přímo přenášet napětí z C_1 na C_3 bez propojení a zprostředkování článkem C_2 , jak je tomu u řešení se snižovacími - zvyšovacími měniči. Ve výsledku je tedy během nabíjení modulu celková účinnost vyrovnávacího napěťového procesu vyšší.

Hlavní nevýhodou je, že stav každého tranzistoru je propojen se stavem ostatních kvůli transformátoru. Je zde tedy přímá vazba mezi prvky obvodu. Tranzistor není možné spínat nezávisle na ostatních. Řídicí systém musí prvně detekovat superkapacitor, který má nejvyšší napětí a potom umožnit sepnutí příslušného souvisejícího tranzistoru, zatímco ostatní blokuje.

Pokud má příliš vysokou úroveň napětí hned několik superkapacitorů, musí být řídicí signály pro určité zúčastněné tranzistory znásobeny, abychom měli ve stejném okamžiku jen jediný tranzistor v propustném stavu. Navzdory složitosti v řízení tohoto principu, má zapojení výhodu přímého přenosu elektrického napětí z nejvíce nabitých superkapacitorů k nejméně nabitým bez přechodné akumulace. Tato metoda umožňuje samostatně nastavovat dodávání elektrické energie na články, které mají nejnižší napětí.[2]

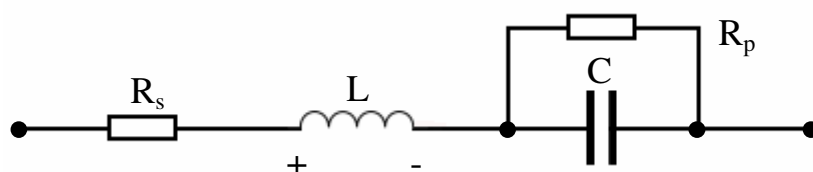
Ve výsledku lze tedy napsat, že aktivní vyrovnávací obvody mohou být jednoduché a nenáročné nebo i složité. Přínosem aktivního vyrovnávání je rychlost, přesnost, vyrovnané rozdělování napětí a minimální parazitické ztráty. Nevýhodou jsou vyšší náklady, jak ukazuje zjednodušené schéma takového obvodu s porovnávacím zařízením – komparátorem. U této konfigurace si všimněme, že každý obvod funguje pro dva sériově spojené články, porovnává jejich napětí a upravuje nabíjecí proces tak, aby tyto dva články vyrovnal.



Obrázek č.33 Zjednodušený model aktivního vyrovnávacího obvodu s komparátory

3. Navrhování obvodů se superkapacitory

V obecném elektrickém obvodu mohou být klasické konvenční kapacitory nahrazeny superkapacitory. Obvodové schéma na obrázku 34 ilustruje model prvního řádu pro superkapacitor. Skládá se ze čtyř ideálních obvodových prvků: kapacity C , sériového rezistoru R_s , paralelního rezistoru R_p a sériové indukčnosti L . Odpor R_s se rozumí ekvivalentní sériový odpor (ESR) a přispívá k energetické ztrátě během nabíjení a vybíjení superkapacitoru. Odpor R_p představuje ztráty samovybíjením článku a je nazýván také jako ztrátový proudový odpor. Indukčnost L vychází primárně z fyzické stavby superkapacitoru a je obvykle malá. V mnoha aplikacích ji však nelze zanedbat, zvláště pak pracuje-li zařízení na vysokých frekvencích nebo je trvale vystavené stálému spínání. Odpor R_p je v praxi vždy mnohem větší než R_s .



Obrázek č.34 Náhradní schéma superkapacitoru s idealizovanými prvky

Použití superkapacitorů jako uložitelů energie při jakémkoli použití sebou nese uvážení řady faktorů. Za prvé, superkapacitorové napětí na svorkách se rozkládá podle toho, jak bylo vybíjeno. Za druhé, jednotlivé napětí článku je obvykle omezeno na několik voltů, takže pro vysoké napětí je vyžadováno spojit superkapacitorové články do série. To však ale vede k celkovému zvýšení ESR. Ve výsledku, když je zapotřebí sériové spojení článků, musíme zajistit taková opatření, aby nemohlo dojít k lokálnímu přepětí.[3]

Rozklad napětí

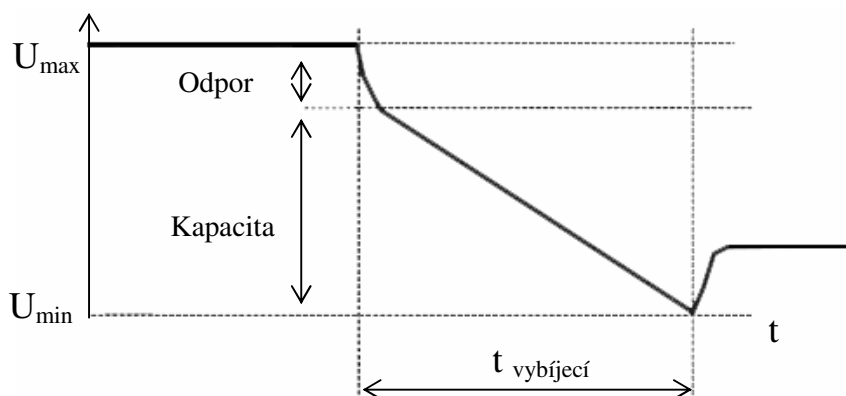
Napětí na svorkách superkapacitoru je přímo závislé na části nabíjecího zbytkového napětí, takže i když je superkapacitor vybit, napětí bude klesat. Proto musí být uvažovány stejnosměrné požadavky na zátěž a můžeme brát v úvahu dvě možnosti, jak toto zajistit.

Pokud zátěž umožňuje funkci v celém rozsahu pracovního napětí, pak mohou být i superkapacitory dimenzovány, aby umožnily pokles napětí. Budeme-li uvažovat jednoduchý ekvivalentní RC obvod skládající se z kapacity a ESR dojde v průběhu času k poklesu napětí, které lze vypočítat

$$dV = i \frac{dt}{C} + iR \quad (14)$$

kde R je ESR (ekvivalentní sériový odpor), i je střední proud, dV je dovolená změna napětí a dt je nabíjecí a vybíjecí čas.

Vybíjecí charakteristika superkapacitoru má kapacitní a odporovou složku.



Obrázek č.35 Teoretický průběh vybíjení superkapacitoru

Pokud musí být dodáváno konstantní stejnosměrné výstupní napětí, pak by měl být použit DC-DC (stejnosměrný) měnič. Ve spínacím režimu můžeme udržovat konstantní výstupní stejnosměrné napětí pro určitý rozsah vstupních napětí.

Výpočet obvodových veličin

Velký počet aplikací elektroniky bude vyžadovat větší napěťové nároky (úrovně) než, které může poskytnout samostatný superkapacitor. Proto je často nutné spojit řadu superkapacitorů do série, aby mohly dodávat požadované stejnosměrné napětí. Celkové množství dodaného napětí je pak jednoduše produkováno jednotlivými napětími článků a počet článků v sérii pak vypočítáme

$$V_{celkové} = C \cdot N \quad (15)$$

kde C je jmenovitá kapacita každého superkapacitoru a N je počet superkapacitorů zapojených do série.

Každý superkapacitor zapojený v sérii se ale také podílí na zvyšování ESR a tím i celkového odporu modulu, avšak pokud povolují požadavky na napájení a ESR, pak může být také použito paralelní zapojení.

Pro superkapacitorový modul s M paralelními větvemi, kde každá paralelní větev složená z N superkapacitorů zapojených do série se celkový ekvivalentní odpor vypočítá

$$R_{celkový} = R \cdot \frac{N}{M} \quad (16)$$

kde R je ESR (ekvivalentní sériový odpor) jednotlivých článků. Větší množství paralelních větví bude proto vést ke snížení celkového odporu modulu.

Požadavky na celkovou kapacitu modulu budou určeny z energetických potřeb ve vztahu mezi energií a kapacitou, která byla popsána již v dřívějším vztahu 2. Celková kapacita modulu se vypočítá

$$C_{celková} = C \cdot \frac{M}{N} \quad (17)$$

4. Realizace a popis obvodu pro aktivní vyrovnávání napětí

Pro návrh a konstrukci aktivního vyrovnávacího obvodu byla využita inspirativní předloha obvodu společnosti Maxwell, která zavádí elektronické řízení článkového napětí ve standardních i na zakázku vyrobených modulech pro řízení superkapacitorového napětí. Při realizaci bylo nutné brát v úvahu, že celý obvod pracuje s rozdílem napětí (na jednotlivých vyrovnávacích obvodech) o velikosti cca 0,6 V. Díky této malé hodnotě napětí je potřeba volit prvky obvodu co možná nejpřesnější. Tento aktivní obvod pro vyrovnávání napětí prošel několika stupni vývoje, až po současnou verzi, která je tou nejspolehlivější. Tato pasáž poskytuje detailnější popis elektroniky pro řízení článkového napětí a jejich výhod.

Klíčová zdokonalení:

- Vyladění obvodu dle požadavků na vyrovnávání
- Vyšší účinnost s redukcí parazitních ztrát
- Dokonalejší funkce pro celý rozsah teplotního pásma
- Dokonalejší filtrování a provoz při kolísajícím příkonu
- Zvýšený vyrovnávací výkon pro rychlejší vyrovnávání

Metoda řízení napětí

Tento způsob zapojení pro aktivní řízení napětí použitý v nově vyvinuté aktivně vyrovnávací elektronice dokáže spojitě ovládat klesající proud v pásmu 300 - 400 mA v každém článku, kdykoli je specifické napětí článku v pásmu nad nebo rovno 2,73 V. Spouštění zapnutí-vypnutí napětí řídicích obvodů bylo optimalizováno pro výkon s ohledem na teplotu a další vlivy. Napětí každého článku je individuálně monitorováno a porovnáváno s referenční hodnotou napětí. Když je referenční hodnota překročena, řídicí obvod aktivně redukuje napětí tohoto článku až pod vypínací hodnotu. Jakmile je článek pod kritickou hodnotou napětí, jak je definováno výše, řídicí obvod článku přejde do klidového stavu dle vyrovnávací aktivity. Udržování tohoto článkového napětí pod vypínací hodnotou zajistí maximální životnost článků a tím také i maximální životnost modulů.

4.1. Popis pro jednotlivé prvky v zapojení

- Q1: Ochrana proti přepólování.
- R18, R21: Dělič napětí pro nastavení vybíjecí hodnoty obvodu řídicího napětí.
- C1: Dolnoproustný filtr s rezistorem R18 proti oscilacím a s funkcí přechodného hrazení.
- U1: Integrovaná reference – komparátor (porovnávací prvek). Výstup s otevřeným kolektorem. Obvod snižuje napětí, až je dosaženo prahové hodnoty, v tomto případě standardně 2,2 V. Spolu s výše uvedeným děličem napětí nastavuje tento obvod vypínací hodnotu řídicího napětí na 2,8 V. Obsahuje hysterezi (zpoždování) 100 mA.
- R19: Zásuvka k umístění rezistoru pro přídavnou hysterezi.
- R1: Zdvihový rezistor pro zapnutí Q5, pokud U1 vypne.
- Q5: První zesilující stupeň, nutno zajistit fungování v celém pásmu zesílení Q4.
- R5: Rezistor omezující proud ke snížení vztažného proudu (báze) Q2.
- R2: K prevenci nastavení samočinného předpětí báze Q2.
- Q2: Druhý zesilující stupeň.
- R4: Rezistor omezující proud do báze Q4.
- R8: K prevenci nastavení samočinného předpětí báze Q4.
- Q4: Primární tranzistor k rozptýlu energie v člancích pracující v modu konstantního proudu k rozptýlu většiny energie v Q4 a ne v R9/R10.
- R9, R10: Součást obvodu proudové zpětné vazby, nastaveno tak, aby napětí 0,6 V na těchto prvcích dodávalo do obvodu požadovaný proud. Dva zapojené paralelně pro lepší rozptýl energie.
- Q7: Omezuje napětí podle báze Q4 pro nastavení konstantního proudového módu.
- R7: Rezistor omezující proud do báze Q6.
- Q6: Použit jako invertor pro sepnutí Q3.
- R6: Rezistor omezující proud do báze Q3.
- R3: Pro prevenci nastavení samočinného předpětí do báze Q3.
- Q3: Zdrojový proud, pokud je obvod řídicího napětí aktivní.
- D1: Všechny obvody pro řízení napětí jsou boolovské povahy (tzn., že obvody jsou „logické“ – využívají pasivní prvky se kterými lze vytvořit členy AND nebo OR). D1 brání polarizaci Q3 jiným obvodem pro řízení napětí.
- R20, D2: Pro oživení (ladění) zařízení, LED se zapne, pokud je obvod řídicího napětí aktivní.

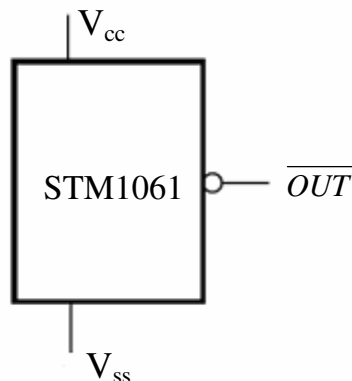
Popis pro jednotlivé prvky v zapojení – hodnoty a typy

C1:	0,1 μF , fóliový kondenzátor radiální, 63 V
D1:	1N4148, dioda, 74 V/ 0,2 A
D2:	LED červená, svítivá dioda, 3 mm, $U_f = 1,7$ V
Q1:	NTR4101P (SMD), MOSFET s P kanálem, 8 V max., $I_D = 9$ A @ $V_{GS} = 2,5$ V, $R_{DS(on)} = 120$ m Ω max.
Q2, Q3:	MMBT2907ALT1 (SMD), bipolární PNP tranzistor, $I_c = 0,8$ A, $h_{FE} = 50$ min.
Q4:	MJD112G (SMD), komplementární Darlingtonův NPN tranzistor, $T_j = 150$ °C max., $h_{FE} = 200$ min.
Q5, Q6, Q7:	2N2222A, bipolární NPN tranzistor, $I_c = 0,6$ A, $h_{FE} = 35$ min.
R1, R2, R3, R7, R8, R22:	100 k Ω , rezistor uhlíkový, 1 % tolerance, $P_z = 0,25$ W
R18:	24,3 k Ω , rezistor uhlíkový, 0,1 % tolerance, $P_z = 0,25$ W
R19:	Neosazeno. Rezistor - zásuvka k umístění rezistoru pro přídavnou hysterezi.
R4, R20:	100 Ω , rezistor uhlíkový, 1 % tolerance, $P_z = 0,25$ W
R21:	115 k Ω (SMD), rezistor thin film, 1 % tolerance, $P_z = 100$ mW
R5, R6:	10 k Ω , rezistor uhlíkový, 1 % tolerance, $P_z = 0,25$ W
R9, R10:	4,02 Ω , rezistor uhlíkový, 1 % tolerance, $P_z = 0,25$ W pro nedostupnost použito: 4,7 Ω , rezistor uhlíkový, 1 % tolerance, $P_z = 0,6$ W
U1:	STM1061N22 (SMD), malovýkonový napět'ový detektor, s přepínáním napětí po kroku 0,1 V, s inkrementem od 1,6 V do 5,5 V, spouštění na hodnotě 2,2 V, s přesností ± 2 %, výstup s otevřeným kolektorem, malý napájecí proud 0,9 μA , zabudovaná hystereze, pouzdro SOT23-3.

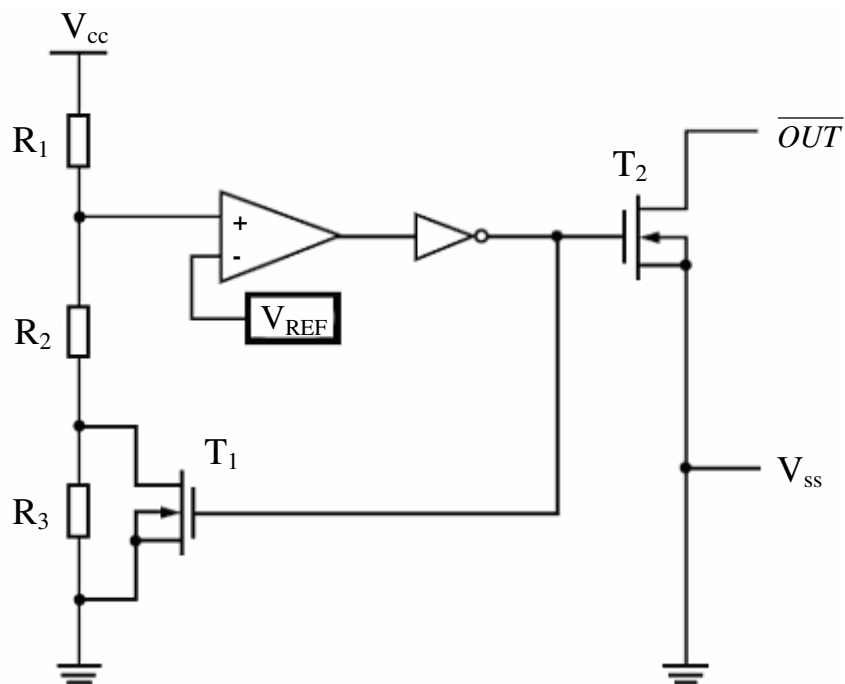
4.2. Bližší popis malovýkonového napět'ového detektoru STM1061

Jednou z klíčových součástí celého navrženého aktivního vyrovnávacího obvodu je malovýkonový napět'ový detektor STM1061N22. Většina aplikací pro vyrovnávání napětí na akumulátorech, superkapacitorech nebo jiných záložních systémech obsahuje více či méně prvek podobný tomuto napět'ovému detektoru. Volba vhodného napět'ového detektoru patří do „know-how“ konstruktérů takovýchto zařízení. Firma STMicroelectronics vyrábí v řadě STM1061 celou škálu obvodů lišících se pouze ve velikosti vstupní prahové napět'ové úrovně. Pro navržený obvod je tato hodnota napětí typicky 2,2 V. Při přesnosti obvodu ± 2 % se počítá s kolísáním od 2,156 do 2,244 V. Tento obvod slouží pro aplikace monitorování stavu baterií, napět'ových zdrojů a regulovaných napět'ových systémů. Přesný zdroj referenčního napětí a komparátor sledují napět'ový vstup ($V_{cc} = V_+$) a porovnávají ho se specifikovaným napět'ovým limitním stavem. Když hodnota na vstupu klesne pod

specifikovanou prahovou úroveň, výstup (\overline{OUT}) je přidržen na nízké úrovni a zůstává v ní, dokud vstup V_{cc} setrvává pod hodnotou prahového napětí V_{TH-} + hystereze (V_{HYST}). Obvodem STM1061 je tedy zaručeno, že výstupem bude správný logický stav V_{cc} až 0,7 V.



Obrázek č.36 Logický diagram obvodu STM1061



Obrázek č.37 STM1061 zapojení N-kanálu s otevřeným kolektorovým výstupem

Obvod STM1061 monitoruje napětí od hodnoty 1,6 V do 5 V ve 100 mV přírůstcích (inkrementech). Detektor je navržen tak, aby ignoroval rychlé přechodové změny V_{cc} a má zabudovanou hysterezi (V_{HYST}). Dále obvod drží výstupní signál (\overline{OUT}), když vstup V_{cc} jde pod prahovou úroveň (V_{TH-}). Výstupní signál (\overline{OUT}) zůstává udržován do doby, kdy vstupní V_{cc} jde nad napěťovou uvolňovací úroveň (V_{TH+}). Pro aplikační účely je možné zapojovat tyto obvody paralelně.

4.3. Vlastnosti a výhody napěťového vyrovnávacího obvodu

Vlastností stávajícího zapojení plně akceptují reversní napětí, což tomuto obvodu umožňuje odolávat plnému zpětnému náboji bez poškození elektroniky obvodu nebo jeho kondenzátorů. I když se nedoporučuje měnit polaritu napětí na superkapacitorech nebo modulu, toto nové zapojení funguje i poté správně a to i při reverzi napětí. Pokud například modulu se superkapacitorem povolíme úplné samočinné vybití, je možné, že některé superkapacitory v modulu mohou mít místy záporné napětí. Tento stav a následné dobití modulu nepoškodí vyrovnávací elektroniku.

Obvod má vyrovnání v celém teplotním pásmu, což umožňuje stabilní výkon obvodu v plném rozsahu provozních teplot. Této vlastnosti je dosaženo stabilním napěťovým referenčním subsystémem pro celé pásmo teplot, zajišťujícím přesnost vyrovnávacího schématu po dobu provozu. Tím se také předchází nestabilitě obvodu řídicího napětí, když je napěťový článek v přechodných podmínkách (nabíjení - vybíjení) a nebo pokud je obvod řídicího napětí napájen proudem přímo z kapacitoru.

To samé zapojení zahrnuje monitorovací fázi, která indikuje extrémní stav zařízení stop - nabíjení, kdy článek dosahuje maximálního povoleného provozního napětí. Každý monitorovaný výstup má integrovaný analogový OR obvod. Tento obvod je navržen k překlopení při hodnotě napětí 2,73 V a při tomto impulsu bude obvod pracovat na rychlé redukci napětí článku, až pod prahovou hodnotu 2,70 V, kdy obvod přejde opět do klidové fáze. Vyrovnávací doba se standardně měří na minuty a čím je menší kapacita článku, tím rychleji je vyvažovací obvod schopen redukovat na něm napětí.

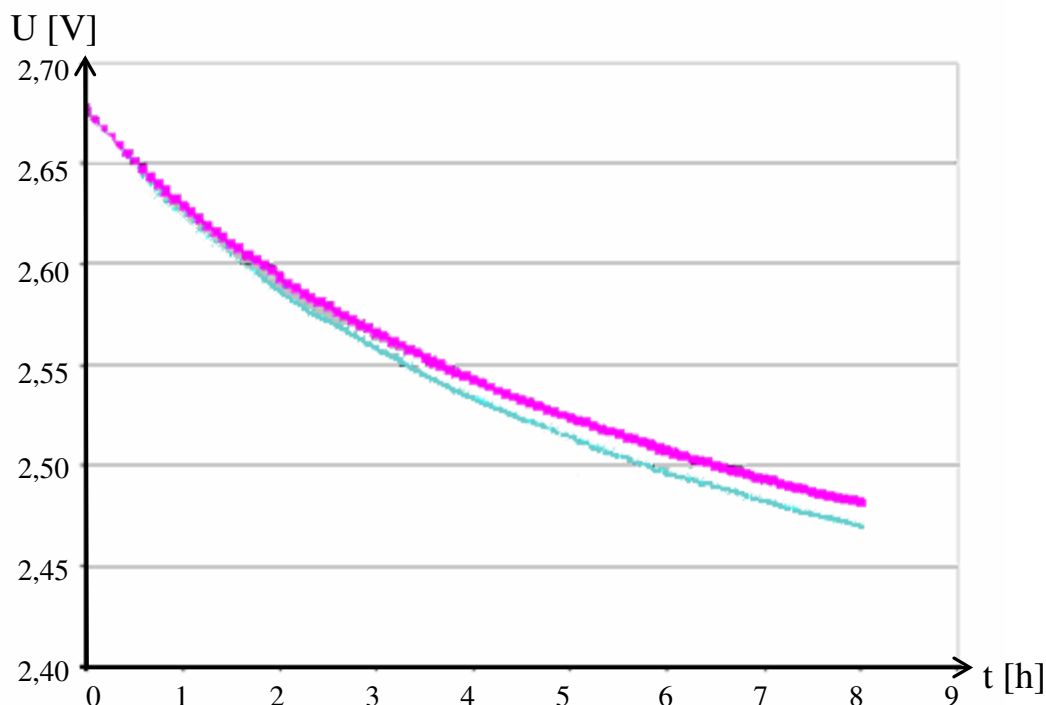
Současné zapojení zmíněného obvodu má asi jen desetinové nároky na klidový proud ve srovnání s předchozí vyrovnávací elektronikou. Činí cca 30 μA při pokojové teplotě. Díky tomu poslední vyrovnávací moduly s těmito obvody (včetně těžkých přenosných modulů) budou vykazovat extrémně nízký vliv parazitního vybíjení. Navíc tento současný návrh toleruje širší variabilitu příkonu, což ho činí odolnějším ve srovnání s nároky na nestabilní napájecí napětí pro filtrační subsystém rozprostřený napříč zapojením.

Nejnovější typy modulů pro napětí 16,2 V a 48,6 V mají jeden opticky izolovaný výstup k indikaci přepětí, jakmile kterýkoli zapojený článek překročí napěťový práh. Nominální hodnota tohoto prahu je 2,80 V (+/- 0,6 V). Signál tohoto překročení může být sledován, což zajistí, že stav nabíjení každého článku je v bezpečném provozním pásmu. Tato aktivace napěťového vyrovnávání nastává ještě před prahovou hodnotou přepětí, takže signál pro prahovou hodnotu napětí je určen jako impuls pro ukončení nabíjení. Nabíjení může pokračovat, až se stav upraví. Pokud obvod překlopíme na nabíjení i během přepětí, další nabíjení posune napěťový článek ještě k vyšším napěťovým hodnotám, což ho může zničit nebo zkrátit jeho životnost v závislosti na nabíjecím proudu. Monitorování signalizace přepětí článků, kdy modul běží v blízkosti maximálního napětí je dobrým způsobem, jak zvyšovat životnost příslušného zařízení.

Popis obvodu

Samočinné vybíjení

Hlavní výhodou současného obvodu řízení napětí pro aktivní vyrovnávání je minimální klidový odběr na modulu, kdy všechny články pracují v rozmezí jmenovitých napětí. Klidový odběr modulu je menší než $30 \mu A$ při pokojové teplotě. Obrázky 38 a 39 srovnávají chování při samočinném vybíjení článku s kapacitorem bez vyrovnávací elektroniky a s vyrovnávacími obvody. Když je obvod ve stavu naprázdno, modul se chová podobně jako kapacitor a vykazuje minimální vliv vyrovnávacího obvodu na napěťovou ztrátu během samočinného vybíjení modulů. Obrázek 38 znázorňuje křivky samočinného vybíjení jednotlivých kapacitorů BCAP3000. Pod grafem je výpočet velikosti samočinného vybíjení. Obrázek 39 znázorňuje vybíjecí křivku pro dva moduly 125 V.



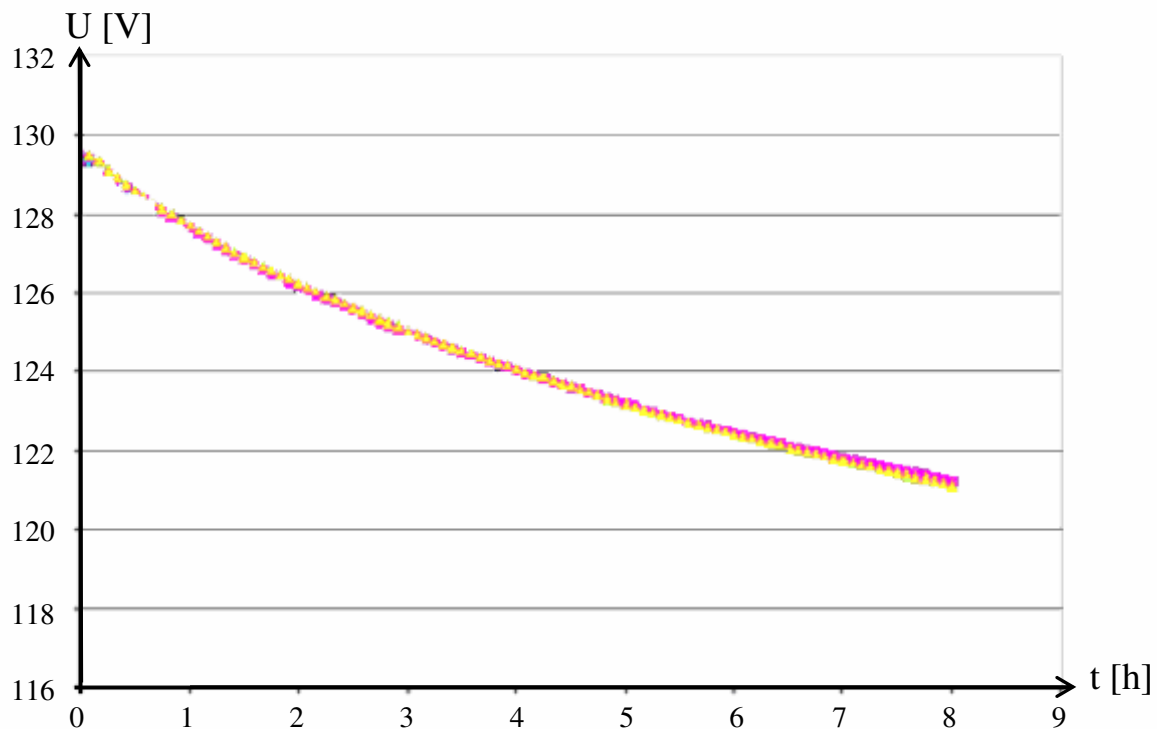
Obrázek č.38 Chování BCAP3000 při samočinném vybíjení bez vyrovnávací elektroniky

Napěťová ztráta na kapacitorech v rozmezí 8 hodin se vypočítá

$$\text{stav nabití} = \frac{V_i - V_f}{V_i} \cdot 100\% \quad (18)$$

Z výše uvedené rovnice se vypočítá stav nabití po 8 hodinách

$$\frac{2,67 - 2,48}{2,67} \cdot 100 \approx 7\% \Rightarrow 93\%$$



Obrázek č.39 Chování BMOD0063 P125 při samočinném vybíjení s vyrovnávací elektronikou

Napěťová ztráta na kapacitorech v rozmezí 8 hodin se vypočítá

$$stav\ nabití = \frac{V_i - V_f}{V_i} \cdot 100\% \quad (19)$$

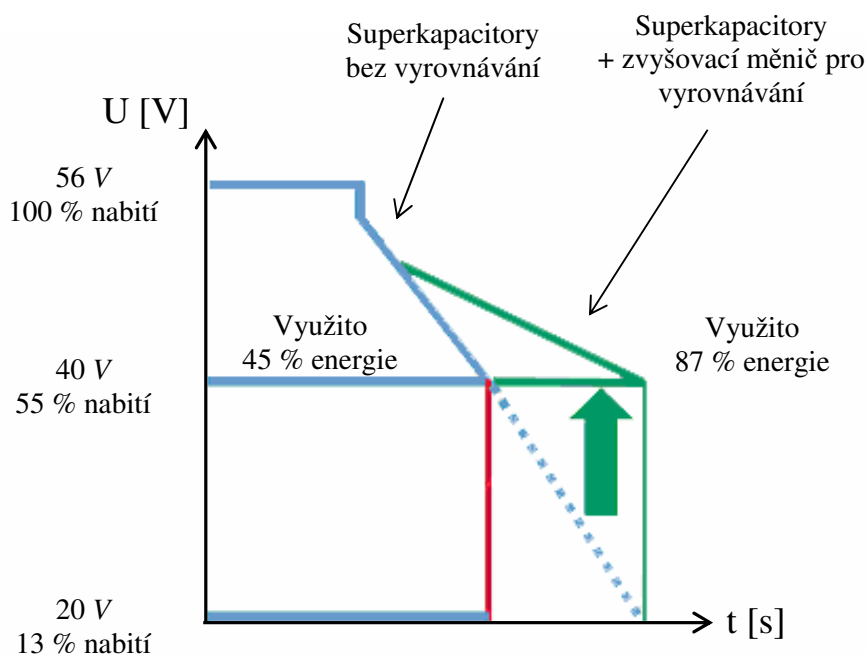
Z výše uvedené rovnice se vypočítá stav nabití po 8 hodinách

$$\frac{129,6 - 121,1}{129,6} \cdot 100 \approx 7\% \Rightarrow 93\%$$

Tyto výpočty i s uvažováním chyby měření v grafu, indikují zbývajících napětí na modulu 125V, které je přibližně stejné jako zbývajících napětí na jednotlivých kapacitorech. To znamená, že pod hodnotou nižší než je spouštěcí, má vyrovnávací obvod minimální nebo žádný parazitický vliv na chování při samočinném vybíjení modulu.

Pokud musí superkapacitor dodat 75 % své energie, musí být vybit na 50 % svého počátečního napětí. Více superkapacitorů poskytuje více akumulované energie, takže aktuálně potřebná energie může být získána bez velkého vybití superkapacitorů. To však znamená navíc nevyužitou kapacitu a zvýšení nákladů. Pro zapojení, která vyžadují užší napěťové pásmo nebo kde má docházet k vybití vyššímu než je 75 % energie článku, může být použita výkonová elektronika mezi superkapacitorem a zátěží. Ta poskytuje ovladatelnější napěťový rozsah pro zátěž. Napěťové pásmo, ve kterém pracuje zbytek systému, může ovládat stejnosměrný měnič. Vstup stejnosměrného měniče bude mít široký pracovní napěťový rozsah. Výstupem bude užší (předpokládejme konstantní) stejnosměrné a vyrovnané napětí potřebné pro spotřebič.

Následující obrázek ukazuje dvě vybíjecí křivky, pro modul bez přídavné a s přídavnou vyrovnávací elektronikou. Uvažujme teoretický předpoklad, že bylo použito 22 článků v sérii pro napětí 56 V systému (2,54 V / článek). V tomto zapojení je minimální napětí pro zátěž 40 V. To znamená, že pokud by byly použity pouze samotné superkapacitory, mohlo by být dodáno zátěži pouze 45 % energie (vybití z 56 V na 40 V). Graficky je tento průběh znázorněn modrou čarou. Začleněním stejnosměrného měniče může být výstupní napětí blokováno od vlastního superkapacitorového napětí, což umožní větší vybití bez možnosti vystavit zátěž příliš nízkému napětí. Tento průběh je znázorněn zelenou čarou. Když se články bez vyrovnávání vybijí na 20 V (prerušená modrá čára), výstup s vyrovnáváním je omezen ještě na cca 40 V (silná zelená čára). Obvod může nyní dodat 87 % své energie a stále poskytuje zátěži přijatelné napětí.



Obrázek č.40 Vybíjecí křivky pro superkapacitory (22 článků) s a bez vyrovnávací elektroniky

Opakování cyklů

Modul byl nabit téměř na předepsané napětí, které udržoval asi 4 hodiny v prostředí 40 °C. Asi za 4 hodiny byl modul opakovaně testován po dobu dalších 4 hodin. Během této doby byla okolní teplota snižována ze 40 na 25 °C. Nakonec byl modul vybit až na polovinu předepsaného napětí, a tak udržován asi 14 hodin. V průběhu tohoto testování nezačalo napětí na jednotlivých kapacitách kolísat. [Maxwell]

Provozní a praktické faktory

Nastavení modulu

Před uvedením modulu do provozu se doporučuje nabít modul na maximální uvedené napětí a udržovat ho přibližně po dobu trvání jedné hodiny. To zajistí vyrovnaní případných počátečních nabíjecích disbalancí, ke kterým mohlo dojít skladováním, dopravou nebo během manipulace. Stejně nastavení modulu k vyrovnaní jeho vnitřního stavu, lze provést kdykoli po jeho uvedení do provozu. Současná elektronika nevyžaduje vnitřní modulové vyrovnávání a pokud jsou moduly zapojeny společně v sérii, nemají primárně k dispozici jako dříve vnitřní mezimodulární vyrovnávací propojení.

Reverzace napětí

Platí všeobecné pravidlo, že by propojené superkapacitory neměly pracovat v podmínkách reverzního napětí, které jsou krátkodobě (cca hodiny) a příležitostně (méně než 100x po dobu životnosti součástky) neškodné. Avšak pokud superkapacitorový článek pracuje při reverzním napětí nebo je ponechán v těchto podmínkách po dobu delšího intervalu, potom dochází ke zrychlené degradaci výkonu superkapacitoru a zkracování životnosti zařízení.

Zpětná kompatibilita

Současná elektronika je plně kompatibilní s předešlými verzemi vyrovnávacích obvodů. Současné obvody mohou být zapojovány do série s moduly obsahujícími předešlou verzi elektroniky. Při použití různých verzí je pravidlem, že články se stejnou elektronikou jsou spojovány vedle sebe a všechny moduly současné verze jsou na začátku řetězu (co nejblíže kladné polarity).[5]

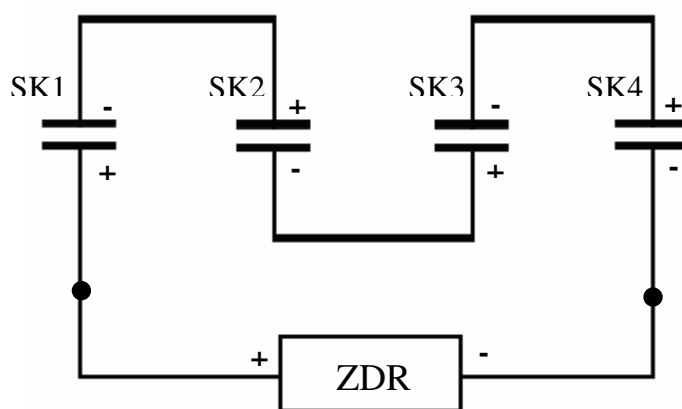
4.4. Výsledky měření a grafy

Pro zjištění správné funkce obvodů aktivního napěťového vyrovnávání je nutné zapojit superkapacitory do sériového propojení. Byly zvoleny tři varianty zapojení

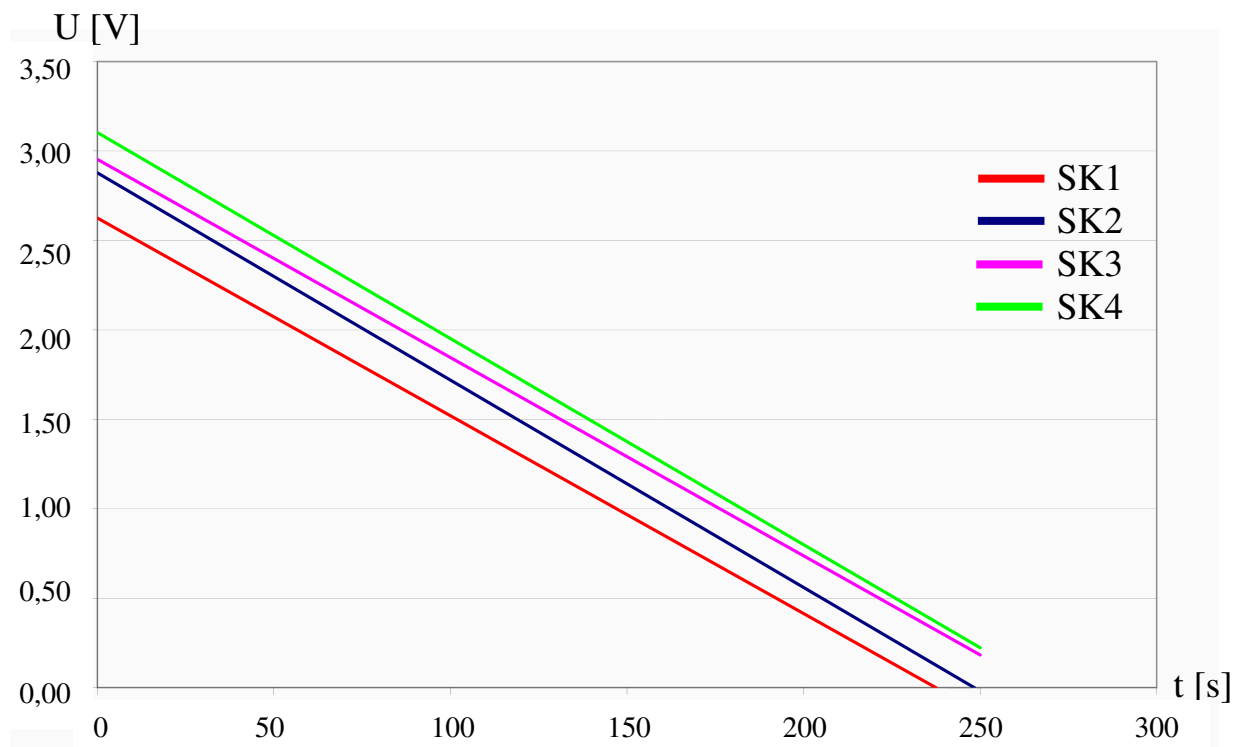
- Bez napěťového vyrovnávání
- S napěťovým aktivním vyrovnávacím obvodem
- S napěťovým aktivním vyrovnávacím obvodem a rozdílnou kapacitou

Výsledky měření bez vyrovnávání napětí

Schéma zapojení



Obrázek č.41 Schéma zapojení pro měření bez AVO

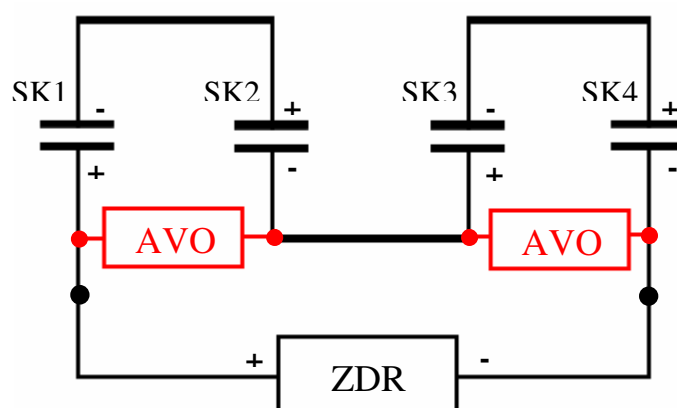


Obrázek č.42 Vybíjecí křivky pro superkapacitory (4 články) bez vyrovnávacího obvodu

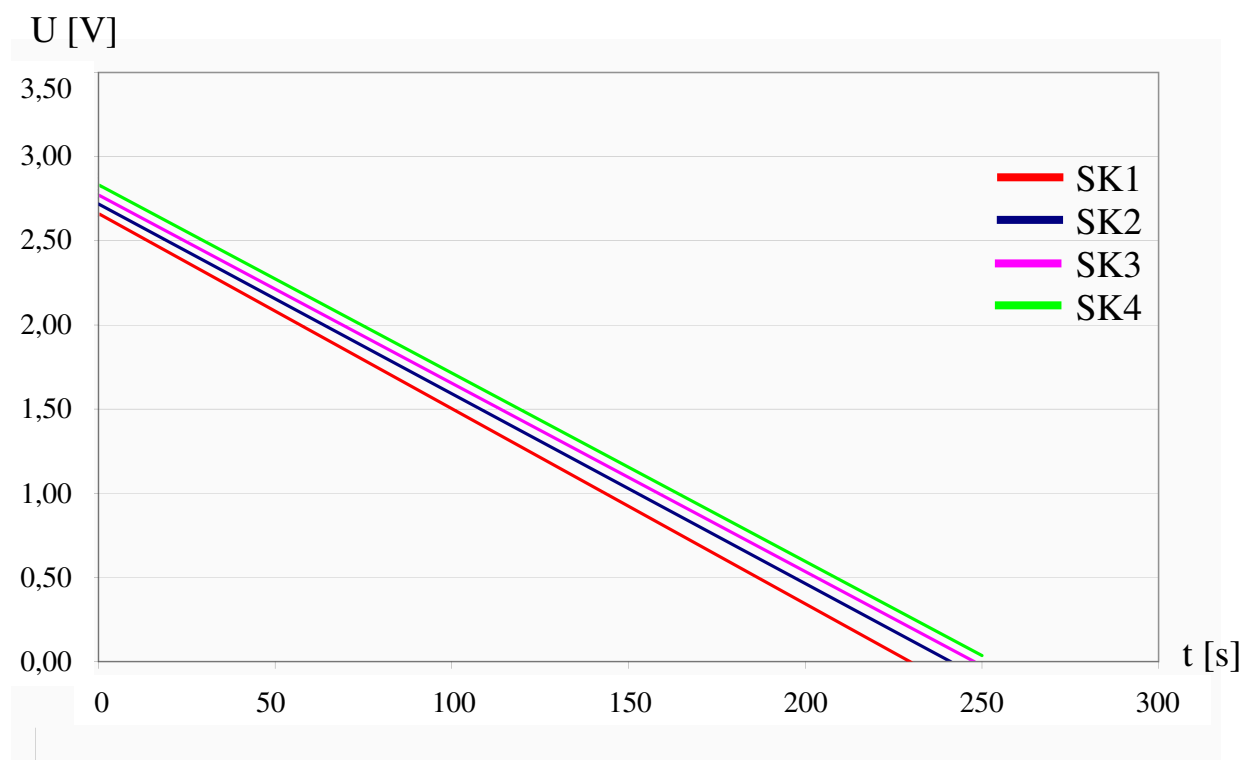
Měření probíhalo na čtyřech sériově zapojených člancích, Maxwell typu BCAP1200 – 2,7V o stejné kapacitě. V první fázi došlo k nabití na maximální hodnoty napětí superkapacitorů a poté k vybíjení do odporu $33\ \Omega / 6\ A$. Při vybíjení se zaznamenávala velikost klesajícího napětí v závislosti na čase.

Výsledky měření s aktivním vyrovnáváním napětí

Schéma zapojení



Obrázek č.43 Schéma zapojení pro měření s AVO

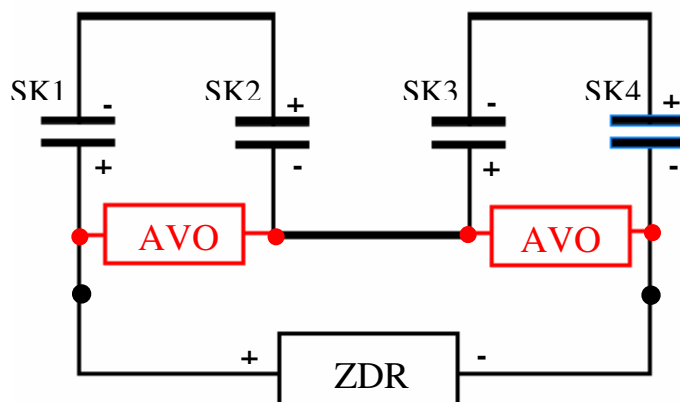


Obrázek č.44 Vybíjecí křivky pro superkapacitory (4 články) s vyrovnávacím obvodem

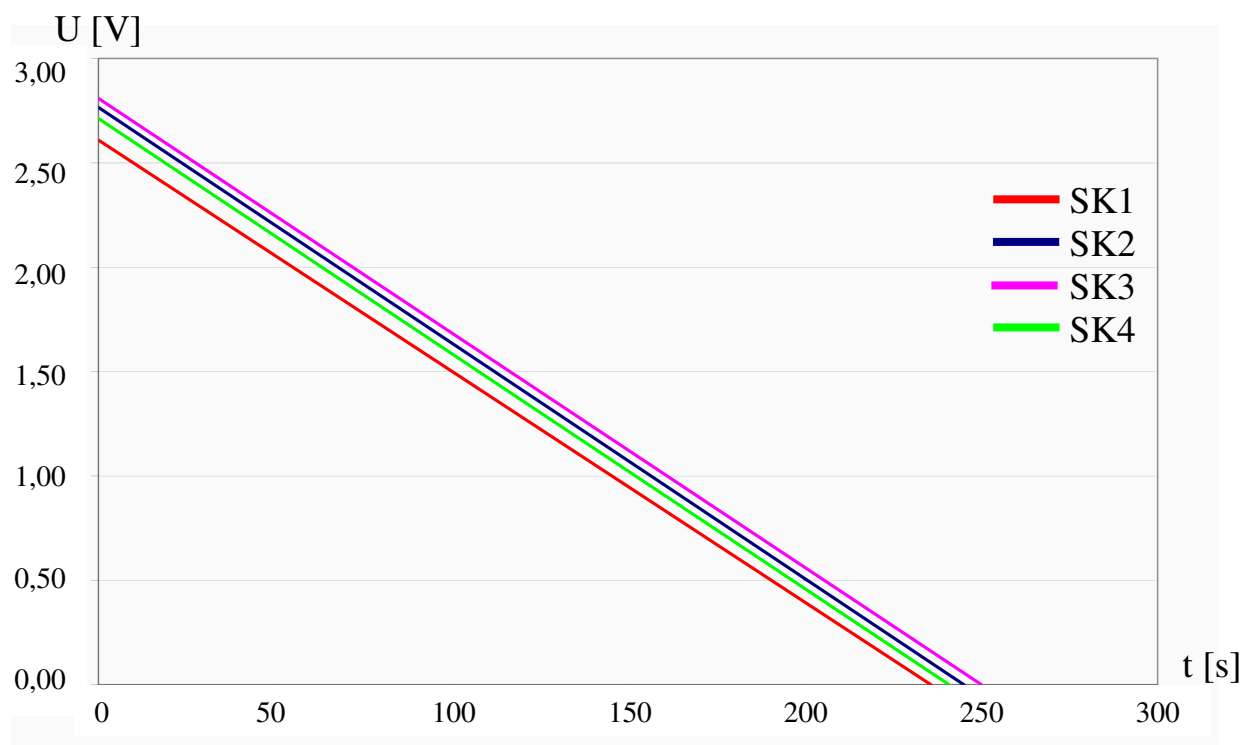
Měření probíhalo na čtyřech sériově zapojených člancích, Maxwell typu BCAP1200 – 2,7V o stejné kapacitě. V první fázi došlo k nabití na maximální hodnotu superkapacitorou a poté k vybíjení do odporu $33\ \Omega / 6\ A$. Při vybíjení se zaznamenávala velikost klesajícího napětí v závislosti na čase.

Výsledky měření s aktivním vyrovnáváním napětí – rozdílná kapacita

Schéma zapojení



Obrázek č.45 Schéma zapojení pro měření s AVO a rozdílnou kapacitou



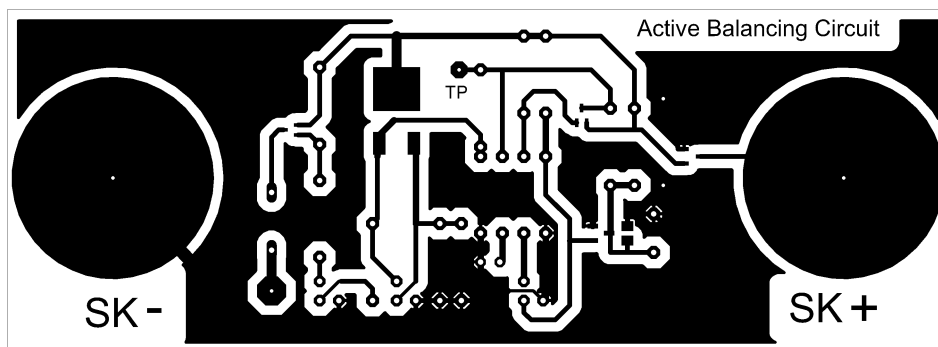
Obrázek č.46 Vybíjecí křivky pro superkapacitory (4 články) s vyrovnávacím obvodem a rozdílnou kapacitou

Měření probíhalo na čtyřech sériově zapojených článcích, Maxwell typu BCAP1200 – 2,7V (3ks) a BCAP3000 – 2,7V (1ks). V první fázi došlo k nabití na maximální hodnotu superkapacitoru a poté k vybíjení do odporu $33\ \Omega / 6\ \text{A}$. Při vybíjení se zaznamenávala velikost klesajícího napětí v závislosti na čase.

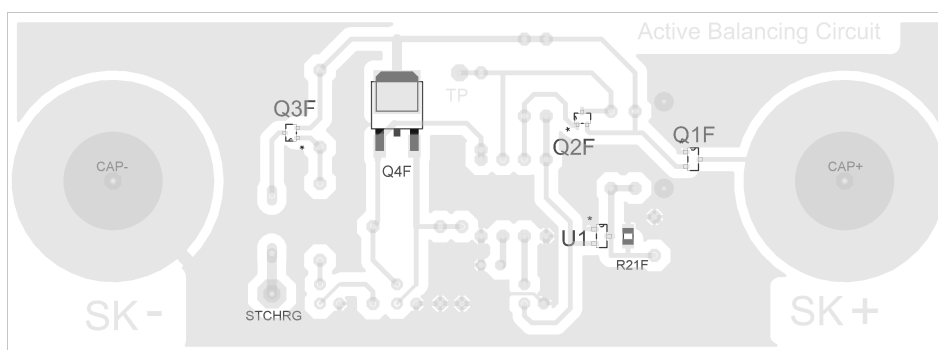
Použité přístroje: Multimetry - Hadex R112, 2x Agilent U1241A, FLUKE 289. Zdroj: Diametral 0-30V/ 0-10A.

4.5. Realizace aktivního vyrovnávacího obvodu

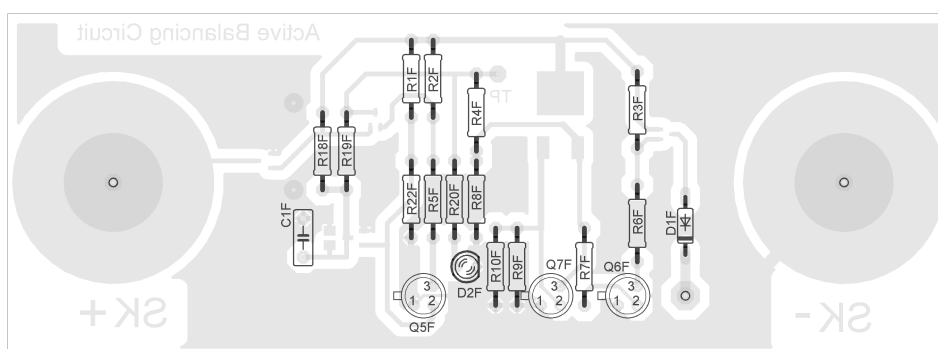
Návrh plošného spoje pomocí software CADSOFT Eagle.



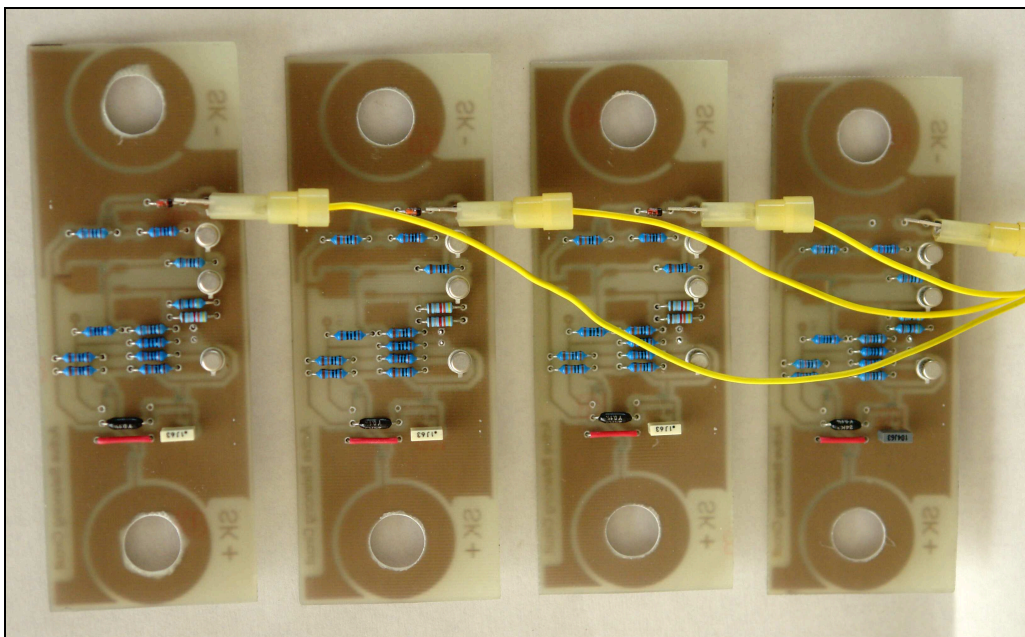
Obrázek č.47 Sestavené obvody pro aktivní napěťové vyrovnávání



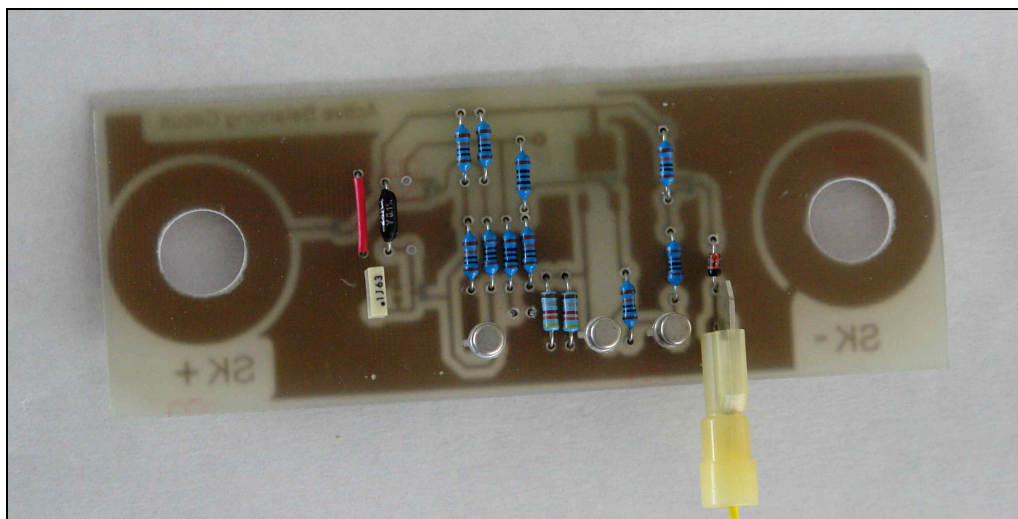
Obrázek č.48 Sestavené obvody pro aktivní napěťové vyrovnávání



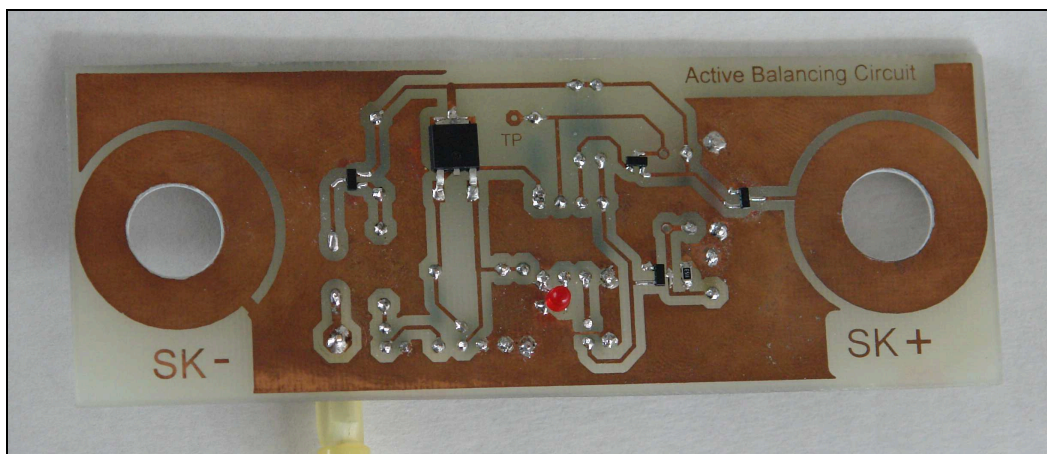
Obrázek č.49 Sestavené obvody pro aktivní napěťové vyrovnávání



Obrázek č.50 Sestavené obvody pro aktivní napěťové vyrovnávání



Obrázek č.51 Aktivní vyrovnávací obvod – pohled ze strany součástek



Obrázek č.52 Aktivní vyrovnávací obvod – pohled ze strany spojů

5. Závěr

V současné době je vhodné použít superkapacitory jako doplněk běžných baterií, abychom dosáhli zvýšení maximálního okamžitého výkonu. Bylo definováno zařízení s aktivním vyrovnáváním napětí, které zajišťuje optimální hodnoty akumulované energie bez přepětí a s optimální účinností. Sestavený modul superkapacitorů s aktivním vyrovnávacím zařízením se stává samostatnou jednotkou, kterou lze spojit s dalšími takovými do série. Tím vznikne akumulací systém s vysokými hodnotami výstupního napětí. V této práci bylo uvedeno, že uspořádání superkapacitorů v modulu má velký vliv na účinnost napěťového vyrovnávání a na ztráty v dalších připojených obvodech. Byla navržena tři řešení aktivního vyrovnávání napětí.

Na superkapacitorech se mohou objevit rozdíly v parametrech, které dávají příčinu vznikat přepětí. Bylo tedy uvedeno několik druhů vyrovnávacích obvodů, aby se tento problém vyřešil: aplikace s rezistory (další modifikace s přepínanými rezistory), Zenerovými diodami a se stejnosměrnými měniči. Teoretické výsledky ukazují, že tyto obvody se liší svou účinností a životností. Vyrovnávací obvody se samostatnými rezistory mírně zlepšují životnost článků, ale snižují jejich účinnost. Přepínané rezistory umožňují omezování ztrátové energie a značně zvyšují životnost. Stejnosměrné měniče okamžitě vyrovnávají napětí přerozdělováním akumulované energie. To zvyšuje účinnost, stejně jako životnost článků.

Odhad odchylek napětí souvisí také s objasněním procesů stárnutí dielektrika. Životnost článků je závislá na dvou faktorech: okolní teplotě a článkovém napětí.

Volba konkrétního řešení závisí především na aplikaci s ohledem na počet článků v sérii a na potřebnou účinnost. Ve srovnání s bateriemi nabízejí superkapacitory dlouhou životnost, a proto se ukázaly jako velmi vhodné pro aplikace v moderním automobilismu. Jsou schopny poskytnout nezbytnou energii pro akceleraci a rekuperovat energii z brzdění. V budoucnu je důležité zkoumat způsoby, jak navrhovat moduly co neoptimálněji, protože superkapacitory umožňují začlenění v nových aplikacích, což umožňuje jejich další rozvoj a tím i inovace v zapojení vyrovnávacích obvodů.

Praktická realizace diplomové práce ukazuje, že na superkapacitorech zapojených v sérii se napětí rozdělí podle velikosti kapacity jednotlivých článků. Po delší době je však napětí na jednotlivých člancích ovlivněno i zbytkovým proudem každého z článků. Potom tedy při stejných velikostech kapacit by měla být jednotlivá napětí totožná.

- V případě zapojení bez vyrovnávání napětí se potvrdil teoretický předpoklad ve smyslu nerovnoměrného rozložení napětí na jednotlivých člancích. Články nelze nabít na shodné maximální napětí a tudíž i vybíjecí křivky nemohou být stejné – nepřekrývají se. Vybíjení takto zapojených superkapacitorů do rezistoru (odporu) by

mělo mít lineární výstupní průběh. V tomto měření vykazoval nejvyšší hodnotu napětí článek SK4. Z průběhu vybíjecích křivek je zřejmé, že články SK2, SK3, SK4 se přebíjejí, což ovlivňuje jejich následnou životnost.

- U varianty zapojení s aktivním napěťovým vyrovnáváním byly dosaženy lepší výsledky napěťového rozložení, avšak porovnání vybíjecích křivek poukazuje na neoptimální rozložení napětí na jednotlivých člancích – vybíjecí křivky se nepřekrývají. Toto může být způsobeno odchylkami ve velikostech a parametrech součástek od doporučeného obvodu společnosti Maxwell. Vyrovnávání pracuje s rozdílem napětí cca 0,7 V (od 2,2 V do 2,86 V), přičemž prahová indikace funguje od 1,65 V na článek. Pro lepší a přesnější funkci obvodu by bylo vhodné při další aktualizaci počítat v návrhu jen se součástkami typu SMD a volit naprosto totožné součástky z doporučeného schématu. Obvod v tomto zapojení funguje, ale vyrovnávání okolo hodnoty 2,5 V je nepřesné ve stejných okamžicích. Při poklesu napětí pod 0,5 V dochází ke zpomalení vybíjecího procesu a tudíž i k větším odchylkám – v tuto dobu již napěťové vyrovnávání nefunguje (z principu funkce obvodu).
- V poslední variantě měření byl začleněn místo původního superkapacitoru BCAP1200 – 2,7V článek BCAP3000 – 2,7V s mnohem větší kapacitou. V řetězci byl umístěn na posledním místě a aktivní vyrovnávání fungovalo totožně jako v předchozím měření se shodnými kapacitami. Nepřesnost vyrovnávacích obvodů však zřejmě způsobila nemožnost nabití článku na jeho maximální hodnotu – 2,7 V. Článek s největší kapacitou byl nabit jen na hodnotu 2,6 V. Proto tedy vybíjecí křivka nedosáhla maxima.

Maximální nabíjecí napětí by mělo být maximálně čtyřnásobné velikosti jmenovité hodnoty napětí superkapacitoru. Ve všech variantách měření s použitím AVO se poměrně dost zahřívala součástka Q4, v jejímž případě bych pro další využití obvodu doporučil pasivní chlazení. Aktivní metoda vyrovnávání je vhodná k nasazení v aplikacích s častým cyklem nabíjení a vybíjení, s rychlými poklesy napětí. Pro méně náročné aplikace bych doporučil spíše levnější metody vyrovnávání napětí.

Seznam obrázků

Obrázek č.1 Struktura superkapacitorového článku

Obrázek č.2 Struktura elektrolyt. kondenzátoru (vlevo) a superkapacitoru s aktivním uhlíkem (vpravo)

Obrázek č.3 Struktura superkapacitoru s modifikovaným uhlíkem (CNTs)

Obrázek č.4 Typy modifikovaného uhlíku s trubičkovou strukturou

Obrázek č.5 Porovnání různých zdrojů el. energie s ohledem na měrnou energii a výkon

Obrázek č.6 Životnost superkapacitoru v závislosti na provozním napětí

Obrázek č.7 Grafické využití superkapacitoru [Zdroj: ECOM s.r.o.]

Obrázek č.8 Sériové spojení superkapacitorů

Obrázek č.9 Pasivní vyrovnávací obvod s rezistory

Obrázek č.10 Energetické nároky: vyrovnávání napětí pomocí rezistorů

Obrázek č.11 Energetické nároky: vyrovnávání napětí se Zenerovými diodami

Obrázek č.12 Pasivní vyrovnávací obvod se Zenerovými diodami

Obrázek č.13 Princip aktivního vyrovnávání

Obrázek č.14 Princip pro vyrovnávání napětí v sériovém zapojení superkapacitorů

Obrázek č.15 Vliv uspořádání superkapacitorů na vyrovnávání napětí

Obrázek č.16 Aktivní vyrovnávací obvod

Obrázek č.17 Aktivní vyrovnávací obvod pro 5 superkapacitorů

Obrázek č.18 Aktivní vyrovnávací obvod

Obrázek č.19 Aktivní vyrovnávání na 5 superkapacitorech

Obrázek č.20 Napětí a proud na induktoru při vyrovnávání napětí

Obrázek č.21 Řídící struktura

Obrázek č.22 Ekvivalentní obvodový model superkapacitoru Maxwell 2600F 2,5V

Obrázek č.23 Napětí článků s přepínanými vyrovnávacími obvody

Obrázek č.24 Vyrovnávání s blokujícím DC-DC měničem s rozděleným sekundárem

Obrázek č.25 Makromodel blokujícího napěťového vyrovnávání s rozděleným sekundárem

Obrázek č.26 Schéma invertujícího měniče

Obrázek č.27 Průběhy napětí a proudu u zapojení invertujícího měniče

Obrázek č.28 Schéma blokujícího měniče

Obrázek č.29 Vyrovnávání napětí pomocí spojených snižovacích – zvyšovacích stejnosměrných měničů

Obrázek č.30 Makromodel snižovacích – zvyšovacích měničů pro vyrovnávání napětí

Obrázek č.31 Napěťové vyrovnávání s propustným stejnosměrným měničem a rozděleným primárem

Obrázek č.32 Makromodel přímého stejnosměrného měniče s rozděleným primárem

Obrázek č.33 Zjednodušený model aktivního vyrovnávacího obvodu s komparátory

Obrázek č.34 Náhradní schéma superkapacitoru s idealizovanými prvky

Obrázek č.35 Teoretický průběh vybíjení superkapacitoru

Obrázek č.36 Logický diagram obvodu STM1061

Obrázek č.37 STM1061 zapojení N-kanálu s otevřeným kolektorovým výstupem

Obrázek č.38 Chování BCAP3000 při samočinném vybíjení bez vyrovnávací elektroniky

Obrázek č.39 Chování BMOD0063 P125 při samočinném vybíjení s vyrovnávací elektronikou

Obrázek č.40 Vybíjecí křivky pro superkapacitory (22 článků) s a bez vyrovnávací elektroniky

Obrázek č.41 Schéma zapojení pro měření bez AVO

Obrázek č.42 Vybíjecí křivky pro superkapacitory (4 články) bez vyrovnávacího obvodu

Obrázek č.43 Schéma zapojení pro měření s AVO

Obrázek č.44 Vybíjecí křivky pro superkapacitory (4 články) s vyrovnávacím obvodem

Obrázek č.45 Schéma zapojení pro měření s AVO a rozdílnou kapacitou

Obrázek č.46 Vybíjecí křivky pro superkapacitory (4 články) s vyrovnávacím obvodem a rozdílnou kapacitou

Obrázek č.47 Sestavené obvody pro aktivní napěťové vyrovnávání

Obrázek č.48 Sestavené obvody pro aktivní napěťové vyrovnávání

Obrázek č.49 Sestavené obvody pro aktivní napěťové vyrovnávání

Obrázek č.50 Sestavené obvody pro aktivní napěťové vyrovnávání

Obrázek č.51 Aktivní vyrovnávací obvod – pohled ze strany součástek

Obrázek č.52 Aktivní vyrovnávací obvod – pohled ze strany spojů

Seznam tabulek

Tabulka č.1 Rozdělování napětí a akumulovaná energie

Seznam příloh

Příloha I: Výkres č. I Aktivní napěťové vyrovnávací schéma

Seznam použité literatury

- [1] BARRADE, Philippe, Serge PITTET a Alfred RUFER. Series connection of supercapacitors, with an active device for equalizing the voltages. [online]. 2000, s. 6 [cit. 2012-04-17]. Dostupné z: <http://www.mendeley.com/research/series-connection-of-supercapacitors-with-an-active-device-for-equalizing-the-voltages/>
- [2] BARRADE, Philippe. Series Connection of Supercapacitors: Comparative Study of Solutions for the Active equalization of the Voltages. [online]. 2000, s. 6 [cit. 2012-04-17]. Dostupné z: http://www.ee.bgu.ac.il/~pedesign/Graduate_problem_papers/Papers_2011/Super_cap_barrade_electri_macs_02.pdf
- [3] YOUNGHO, Kim. Ultracapacitor Technology Powers Electronic Circuits. [online]. 2003, s. 6 [cit. 2012-04-17]. Dostupné z: http://powerelectronics.com/mag/power_ultracapacitor_technology_powers/
- [4] ROBERTSON, Karin. Cell Balancing in Low Duty Cycle Applications. [online]. 2003, s. 1 [cit. 2012-04-17]. Dostupné z: http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/docs/an-002_cell_balancing.pdf
- [5] MAXWELL TECHNOLOGIES. BOOSTCAP Integration Kit. [online]. 2007, s. 8 [cit. 2012-04-17]. Dostupné z: http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/docs/20090316_instruction_manual.pdf
- [6] ECOM S.R.O. Superkapacitory. [online]. 2005, s. 4 [cit. 2012-04-17]. Dostupné z: <http://www.ecom.cz/files/documents-news/108.pdf>
- [7] NOBILIS, J. Teorie elektronických obvodů VIII. (Napájecí zdroje). Skriptum. Pardubice: Školní nakladatelství a vydavatelství SPŠE Pardubice, 2000, 110s.